

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE 2017/2018

ESTUDO EXPERIMENTAL DE MELHORIAS NO ISOLAMENTO SONORO DE PORTAS EXTERIORES

TELMO LUÍS FERREIRA PEREIRA

Dissertação submetida para obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA DO AMBIENTE

Presidente do Júri: Cidália Maria de Sousa Botelho
(Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Engenharia da
Universidade do Porto)

Orientador académico: António Pedro Oliveira de Carvalho
(Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da
Universidade do Porto)

Julho, 2018

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE 2017/2018

Tel.: +351 22 508 1673

Email: catc@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel.: +351-22-508 1400

Fax: +351-22-508 1440

Email: feup@fe.up.pt

URL: <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente - 2017/2018, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2018*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

“O que sabemos, saber que o sabemos. Aquilo que não sabemos, saber que não o sabemos: eis o verdadeiro saber.”

Confúcio, 551 a.C. - 479 a.C.

Agradecimentos

A presente dissertação não é um ponto final, mas sim uma vírgula num período de cinco anos. Anos esses repletos de muito bons e menos bons momentos partilhados por pessoas incríveis as quais eu quero aqui demonstrar o meu profundo agradecimento, em especial:

Ao meu orientador Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho pela sua paciência, respeito e disponibilidade durante todo o semestre. Foi não só um privilégio, mas também um prazer poder trabalhar sob a sua orientação.

Ao Engenheiro Eduardo Costa, pela sua imprescindível ajuda e orientação na componente prática desta dissertação. Também pela sua enorme amizade e paciência para comigo, que durante dois meses me “aturou” quase diariamente.

Ao Sr. Augusto Moreira, da *TRANCAR*[®], pelo fornecimento dos materiais (portas, placas, telas, etc.) que sem estes não seria possível realizar este trabalho. Um agradecimento também pela disponibilidade pessoal aquando das suas visitas ao Laboratório de Acústica da FEUP e na minha visita às infraestruturas da sua empresa.

Ao meu pai, ao Tiago e à minha restante família por todo apoio que direta ou indiretamente me ajudaram a completar esta fase do meu percurso profissional e continuam a lutar ao meu lado para cumprir todos os meus objetivos.

Ao eterno grupo da “Cozinha do Lagoa”, por todos os excelentes serões de mais ou menos trabalho, todos os jantares e ceias e principalmente pela amizade que, apesar de construída em apenas 5 anos, tenho a certeza que vai permanecer para sempre.

À Bea, por todos os sermões motivacionais, por todas a vezes que me fez acreditar em mim mesmo e principalmente por todos os dias me fazer lembrar o quão importante é ter alguém do meu lado a quem posso chamar de namorada.

Finalmente, mas não menos importante, um agradecimento muito especial aos meus padrinhos, por todo o apoio incondicional, que sempre com grande humildade me suportaram, tanto profissionalmente como emocionalmente.

Resumo

As portas são um elemento construtivo existente em qualquer construção arquitetónica, sendo inseridas geralmente a um elemento separador entre divisões.

O ambiente sonoro é importante para o conforto acústico dos indivíduos presentes no interior de uma divisão. Portanto, um bom ambiente sonoro não deve conduzir a mudanças físicas, fisiológicas ou psicológicas que possam afetar de forma negativa a saúde dos indivíduos presentes. Além disso, o ambiente sonoro deve permitir, ou mesmo contribuir, para a obtenção do estado de espírito mais adequado para efetuar uma atividade específica [1]. Como tal um bom isolamento sonoro de um elemento separador, como uma porta, é um fator importante para evitar a entrada de ruídos externos no ambiente sonoro do espaço em que este está inserido e contribuir assim para o melhor conforto acústico possível.

As frinchas presentes em todo o perímetro de uma porta, quando fechada, permitem a passagem de som, e consequentemente uma diminuição do isolamento sonoro global do elemento separador no qual a porta está inserida. Para evitar a fuga de som através das frinchas, geralmente são usados materiais herméticos, como tecido ou materiais à base de borracha. No entanto, é difícil suprimir totalmente estas falhas e a instalação de destes materiais pode criar novas frinchas. Além disso, no caso da utilização de materiais herméticos, não é possível garantir a ventilação através da porta, que pode ser necessária, particularmente em casas de banho ou divisões para idosos ou crianças que requerem ventilação adequada [2].

Esta dissertação tem como objetivo o estudo experimental de hipóteses concretas de melhoria do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea de portas exteriores fornecidas pela marca *TRANCAR*® pertencente ao grupo *Augusto Moreira, Lda.* [3], tendo como base de estudo a sua porta *Standard* (PS). Os ensaios foram realizados nas câmaras reverberantes do Laboratório de Acústica da FEUP, segundo as normas EN ISO 10140 (partes 1, 2, 4 e 5) [4-7] e NP EN ISO 717-1 [8].

Neste trabalho, além de se avaliar e comparar sete diferentes estruturas internas da porta (amostras), também se procedeu à avaliação do efeito da colmatação da sua frincha inferior, e a partir do cálculo do índice de redução sonora R_w e da redução sonora R para cada banda de frequência de 1/3 de oitava, dos 100 aos 5000 Hz, foi possível retirar as seguintes conclusões:

- as soluções que obtiveram as maiores melhorias no índice de redução sonora (cerca de 15 dB) foram a porta *Standard* Melhorada com a placa de 20 mm de *Aglomerado 120kg* [9] e com a tela de 4 mm de *Flexitect G+* [10] (PSM*+Agl+Flex) e a mesma porta com a mesma placa de aglomerado e com a tela de 4 mm de *EPDM 130 Negro* [11] (PSM*+Agl+EPDM), ambas com a frincha inferior completamente tapada pelo “tapa-frinchas” de esponja adaptado;
- a frincha inferior da porta é um dos pontos mais fracos no seu isolamento sonoro, a ruídos de condução aérea, portanto a sua eficaz colmatação é muito importante para garantir melhorias significativas no isolamento sonoro (obtendo-se melhorias máximas de 7 dB);

- a instalação de materiais de colmatação das frinchas da porta durante a fase de construção da porta, tal como sistemas embutidos (solução preventiva), é mais eficaz do que a aplicação de “tapa-frinchas” comerciais após a instalação da porta (solução remediativa);
- a massa da porta é um fator com grande impacto no isolamento sonoro de uma porta, já que comparando as massas por unidade de área da porta *Standard* (PS) e da porta *Standard* Melhorada com a placa *Aglomerado 120kg* (PSM+Agl), a sua quase duplicação aumentou o índice de redução sonora da porta em pelo menos 6 dB. Contudo, pequenos aumentos de massa da porta (< 40%) não originam aumentos significativos no seu isolamento sonoro;
- além do aumento da massa da porta, é importante que espessura dos seus materiais constituintes (telas/placas) seja suficiente de forma a que as suas frequências críticas se situem apenas na região das baixas frequências e, como tal, não originem falhas no isolamento sonoro da porta em frequências mais sensíveis ao ouvido humano.

PALAVRAS-CHAVE: Acústica, Câmara reverberante, Isolamento sonoro, Porta, Frincha inferior.

Abstract

Doors are construction elements existent in any architectural buildings, coupled generally to a partition element between rooms.

The sound environment is a key factor for the individual acoustic comfort, therefore it cannot lead to any negative physical, physiological or psychological effects in the person's health and wellbeing. Moreover, the sound environment should grant the achievement of the most appropriate state of mind to carry out a specific activity [1]. Ergo, obtaining a good sound insulation of a separating element, such as a door, is an important factor to avoid the leakage of external noise into the room sound environment and thus contribute to the best acoustic comfort possible.

When closed, there are slits around the whole door perimeter which can lead to sound leakages and result in a decrease of the door or whole room partition global sound insulation. To avoid these sound leakages, hermetic materials are usually used, like cloths or rubber-based materials. However, the complete seal of these leakages is very difficult, and the installation of these materials can lead to new slits and new sound leakages. Besides, the use of those materials can also prevent the correct ventilation which is particularly needed in small closed spaces like bathrooms or rooms meant for children and elders [2].

The main objective of this thesis is the experimental study of some hypotheses in order to improve the airborne sound insulation of external doors provided by *TRANCAR*®, an *Augusto Moreira, Lda.* brand [3], with their *Standard* door (PS) as base for this study. The sound insulation tests were performed in the reverberation chambers of the FEUP's Laboratory of Acoustics, accordingly to the standards EN ISO 10140 (parts 1, 2, 4 and 5) [4-7] and NP EN ISO 717-1 [8].

In this work, in addition to evaluating and comparing seven different internal structures of the door (samples), it was also evaluated the effect of the complete sealing of its lower slit and, from the calculation of the weighted sound reduction index R_w and the sound reduction for each 1/3 octave frequency band, from 100 to 5000 Hz, it was possible to draw the following conclusions:

- The solutions which obtained the greatest improvements (around 15 dB) in the weighted sound reduction index (R_w), were the Improved *Standard* door with the 20 mm board of *Aglomerado 120kg* [9] and the 4 mm screen of *Flexitect G+* [10] (PSM*+Agl+Flex) and the same door with the same 20 mm board and 4 mm *EPDM 130 Negro* [11] screen (PSM*+Agl+EPDM), both with the lower slit completely sealed by the “slit-cap” of adapted sponge;
- The door lower slit is one of the airborne sound insulation weakest points, therefore its effective sealing is a key factor to ensure significant improvements in sound insulation (obtaining maximum improvements of 7 dB);
- The installation of effective “slit-cap” in the lower slit during the construction phase of the door, such as embedded systems (“preventive solutions”) is more effective than the

application of commercial “slit-caps” after installation of the door (“remedial solutions”);

- By comparing the results of the *Standard* door (PS) and the Improved *Standard* door with the *Aglomerado 120kg* 20 mm board (PSM+Agl), the near-doubling of the door mass increases the sound reduction index (R_w) by at least 6 dB. However, small door mass improvements (<40%) do not give rise to significant increases in sound insulation;
- In addition to increasing the mass of the door, a small increase of the thickness of its constituent materials is also important, so that their critical frequencies would be in the low frequencies region and, as such, not cause sound insulation failures at frequencies which are more sensitive to the human ear.

KEY WORDS: Acoustics; Reverberation chamber; Sound insulation; Doors; Lower slit.

Índice Geral

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice Geral	vii
Índice de Figuras	vii
Índice de Quadros	xiv
Lista de Símbolos e Abreviaturas	xix
1. Objetivos e Descrição	1
1.1. Enquadramento do Tema	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Descrição do Documento	2
2. Conceitos e Definições	5
2.1. Definição de Som e Onda Sonora	5
2.2. Parâmetros Acústicos	8
2.2.1. Pressão Sonora	8
2.2.2. Potência sonora e Intensidade sonora	10
2.2.3. Frequência	12
2.2.4. Tempo	16
2.3. Fenómenos de Transferência Sonora	16
2.3.1. Reflexão	16
2.3.2. Refração	17
2.3.3. Reflexão Difusa	18
2.3.4. Difração	18
2.4. Isolamento Sonoro	19
2.4.1. Isolamento a Ruídos Aéreos	19
2.4.1.1. Definições	19
2.4.1.2. Elementos Simples	21
2.4.1.3. Elementos Duplos	24
2.4.1.4. Elementos Heterógeneos	27
2.5. Tempo de Reverberação	28
2.5.1 Definição	28
2.5.2 Fórmula de Sabine	29
3. Isolamento Sonoro a Ruídos Aéreos de Portas	31
3.1. Estado da Arte	31
3.2. Modelos de Previsão	37

3.3. Legislação	42
3.3.1. Portuguesa	42
3.3.2. Outros Países.....	43
3.3.2.1 Áustria	43
3.3.2.2 França.....	45
3.3.2.3 Holanda	45
3.3.3. Comparação Entre os Países	47
4. Metodologia.....	49
4.1. Introdução	49
4.2. Metodologia	49
4.2.1. Instrumentação e Condições do Medição	49
4.2.1.1 Instrumentação	49
4.2.1.2 Condições de medição	52
4.2.2. Caracterização da Amostra	53
4.2.2.1. Estrutura da Porta <i>Standard</i> (PS).....	53
4.2.2.2. Montagem da Porta.....	56
4.2.2.3. Estrutura da Porta <i>Standard</i> Melhorada (PSM)	57
4.2.2.4. Descrição das Amostras	60
4.2.3. Avaliação do Efeito da Colmatação da Frincha Inferior - pré-amostragem	62
4.2.4. Avaliação do Isolamento Sonoro das Diferentes Composições Internas da Porta <i>Standard</i> Melhorada (PSM) - amostragem.....	64
4.2.5. Metodologia de Cálculo.....	66
5. Apresentação dos Resultados e Discussão	71
5.1. Condições Iniciais	71
5.1.1. Tempo de Reverberação e Absorção Sonora Equivalente	72
5.1.2. Ruído de Fundo	72
5.1.3. Parede de Fecho entre as Câmaras Reverberantes (referência)	72
5.2. Resultados da Avaliação do Efeito da Colmatação da Frincha Inferior - pré-amostragem	75
5.3 Resultados Avaliação do Isolamento Sonoro das Diferentes Composições Internas da Porta <i>Standard</i> Melhorada (PSM) - amostragem	76
6. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	85
6.1. Conclusões.....	85
6.1.1. Efeito da Colmatação da Frincha Inferior - pré-amostragem	85
6.1.2. Efeito das Diferentes Composições Internas da Porta <i>Standard</i> Melhorada (PSM) ..	86
6.2. Propostas de Futuros Desenvolvimentos	89
Referências Bibliográficas.....	91
Anexo	93

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Propagação de uma onda sonora com origem numa fonte pontual, alternância de zonas de maior densidade (escuro) com zonas de menor densidade (claro) [15]	5
Figura 2.2 - Elementos necessários para a propagação do som [16]	6
Figura 2.3 - Deformação do meio com a passagem de uma onda longitudinal (acima) e uma onda transversal (abaixo), representação muito exagerada [17]	6
Figura 2.4 - Variação temporal da pressão instantânea do meio ao longo da passagem de uma onda sonora (“1”: período de tempo em que o meio está em repouso, ou seja, não existe som; “2”: período de tempo em que existe variação da pressão instantânea, 0 como tal existe som; “3”: pressão atmosférica; “4”: variação da pressão sonora)[20]	8
Figura 2.5 - Pressão eficaz (rms - <i>root mean square</i>) [adaptado de 16]	10
Figura 2.6 - Dependência da intensidade sonora com a distância à fonte [16]	11
Figura 2.7 - Distinção entre ondas com alta e baixa frequência [21]	12
Figura 2.8 - Exemplo de um som complexo avaliado em banda de frequência de 1/1 oitava [adaptado de 22]	14
Figura 2.9 - Curvas de igual sensibilidade auditiva [17]	14
Figura 2.10 - Curvas de ponderação A e C [adaptado de 17]	15
Figura 2.11 - Múltiplas reflexões de uma onda sonora num meio limitado por todos os lados [15]	16
Figura 2.12 - Refração e reflexão de uma onda sonora na fronteira entre dois meios diferentes [adaptado de 17]	17
Figura 2.13 - Fenómeno de difusão de uma onda sonora numa superfície rugosa [22]	18
Figura 2.14 - Difração sonora num plano sólido e zona de “sombra” (claro) [15]	18
Figura 2.15 - Difração sonora por aberturas, grande abertura (esquerda) e pequena abertura (direita) comparativamente ao comprimento de onda [24]	19
Figura 2.16 - Distinção entre ruídos de condução aérea (esquerda) e ruídos de percussão (direita) [25]	20
Figura 2.17 - Balanço de potências sonoras num elemento construtivo [adaptado de 15]	20
Figura 2.18 - Transmissão de uma onda sonora, com ângulo de incidência θ [adaptado de 15]	22
Figura 2.19 - Dependência da redução sonora (R), para campo difuso, de uma placa de alumínio de 1 mm de espessura, com a frequência de incidência [17]	25
Figura 2.20 - Representação de ondas estacionárias entre duas superfícies paralelas [26]	26
Figura 2.21 - Dependência da redução sonora com a frequência de incidência, para campo difuso, de duas placas de alumínio de 1 mm de espessura cada, com uma distância de 5cm [17]	27
Figura 2.22 - Definição de Tempo de Reverberação TR , valor teórico (esquerda), valor obtido por extrapolação do declive do decaimento (direita) [adaptado de 14]	28
Figura 2.23 - Valores do tempo de reverberação ideal (s), em função do uso (500-1k Hz) [de Cavanaugh, 1999 consultado em 14]	30

Figura 3.1 - Valores do índice de redução sonora R_w ou STC (dB) de várias portas de empresas, em função da massa por unidade de área (kg/m^2) [27-31]	31
Figura 3.2 - Aproximação logarítmica dos valores dos índices de redução sonora (R_w ou STC, em dB) em função da massa por unidade de área (em kg/m^2) de todos os exemplos considerados [27-31].....	32
Figura 3.3 -Parte inferior da porta acústica de aço STC 57-59 da <i>AMBICO</i> [adaptado de 36] ..	33
Figura 3.4 -Porta metálica <i>Tandem</i> da <i>Overly</i> , modelo 5792190 (em cima à esquerda); desenhos técnicos da mesma porta, vista de cima (em cima à direita), corte secção horizontal (em baixo à esquerda) e corte secção vertical (em baixo à direita). [adaptado de 37,38]	34
Figura 3.5 - Junta de compressão simples <i>Single “H”</i> aplicado nas laterais da porta metálica, modelo 5792190, da <i>Overly</i> (esquerda); Vedante <i>Super “H”</i> aplicado na borda inferior da mesma porta (direita) [adaptado de 38]	34
Figura 3.6 - Valores de índice de redução sonora, R_w ou STC (dB), para cada material, em função da massa por unidade de área (kg/m^2) [27-31].....	35
Figura 3.7 - Frequência crítica do vidro em função da espessura (cálculo pela expressão 2.23 e assumindo uma celeridade das ondas longitudinais de 5200 m/s [14])	36
Figura 3.8 - Aproximação logarítmica dos valores de índice de redução sonora, R_w ou STC (dB), em função da massa por unidade de área (kg/m^2), das portas de madeira e de metal (não aço) [27-31].....	37
Figura 3.9 - Estrutura de cálculos do modelo de impedâncias (<i>Impedance Model</i>) [adaptado de 41]	38
Figura 3.10 - Comparação entre a diferença de nível de pressão sonora ($L_1 - L_2 = \Delta R_w$) e a diferença de níveis de sensação de volume sonoro ($LN_1 - LN_2 \equiv \text{phon}$), em função da frequência, para os dois tipos de sinal em estudo, ruído de banda larga <i>pink noise</i> (esquerda) e ruído musical <i>Eminem</i> (direita) [41]	39
Figura 3.11 - Esquema da transmissão sonora através de uma porta (coeficientes de transmissão τ_{total} , $\tau_{estrutura}$, $\tau_{frinchas}$; potências sonoras incidente W_e e transmitida W_t) [adaptado de 43]	40
Figura 4.1 - Fontes sonoras <i>JBL EON15 G2</i> (esquerda), Microfones <i>Brüel & Kjaer 1/2” - 4190</i> (direita) [Fotos do autor]	51
Figura 4.2 - Sistema de aquisição de dados <i>Brüel & Kjaer PULSE Tipo 3560-D</i> [Foto do autor (esquerda), [51] (direita)].....	51
Figura 4.3 - Termo Higrómetro <i>TESTO 435-2</i> e sonda humidade/temperatura [Foto do autor]	51
Figura 4.4 - Parede de gesso cartonado tripla, antes da montagem da porta (aro e pré-aro) [Fotos do autor].....	52
Figura 4.5 -Esquema (sem escala) das câmaras reverberantes, R1: recetora e E1: emissora, corte vertical (em cima), planta (em baixo)	53
Figura 4.6 - Estrutura da porta <i>Standard</i> da marca <i>TRANCAR®</i> , com todos os seus componentes [53]	54
Figura 4.7 - Estrutura interna da porta <i>Standard</i> , desenho técnico com corte vertical e horizontal (esquerda), estrutura interna sem o painel externo, vista da câmara recetora (direita) [Figura e foto do Autor].....	55
Figura 4.8 - Placa de lã de rocha ($90 \text{ kg}/\text{m}^3$) aplicada na porta <i>Standard</i> [Foto do autor]	56

Figura 4.9 - Porta <i>Standard</i> fechada: detalhe da colmatação da frincha inferior (em cima); Porta inicial aberta, detalhe da soleira móvel com três tiras de borracha (em baixo) [Fotos do autor]	56
Figura 4.10- Abertura da parede entre as câmaras reverberante, vista da câmara recetora (à esquerda), vista da câmara emissora (à direita) [Fotos do autor].....	57
Figura 4.11 - Instalação do pré-aro com detalhes de finalização e preenchimento com lã de rocha [Fotos do autor]	57
Figura 4.12 - Porta <i>Standard</i> instalada na abertura entre câmaras reverberantes, vista da câmara emissora (duas da esquerda), vista da câmara recetora (duas da direita) [Fotos do autor]	58
Figura 4.13 - Estrutura interna da porta <i>Standard</i> Melhorada, desenho técnico com corte vertical e horizontal (à esquerda), estrutura interna sem a placa de aglomerado e o painel exterior, vista da câmara recetora R1 (à direita) [Figura e foto do Autor]	58
Figura 4.14 - Placa de 20 mm de <i>Aglomerado 120kg</i> [9], antes da sua inserção na estrutura interna da PSM (à esquerda), e pormenor da espessura e características da placa (à direita) [Fotos do Autor]	59
Figura 4.15 - Sistema de colmatação da frincha inferior da porta <i>Standard</i> Melhorada, soleira móvel dupla com seis tiras de borracha [Foto do Autor]	59
Figura 4.16 - Tela de 4mm de Flexitect G+ [10], com a folha protetora, antes da sua inserção na estrutura interna da PSM e pormenor da espessura e características da placa (à esquerda); Tela de 4mm de EPDM 130 Negro [11], com a folha protetora, antes da sua inserção na estrutura interna da PSM, e pormenor da espessura e características da placa (à direita) [Fotos do Autor]	61
Figura 4.17 - Tela de 20 mm de <i>PENA 30 FR</i> [12] antes da sua inserção na estrutura interna da PSM (à esquerda), e pormenor da espessura e características da placa (à direita) [Fotos do Autor].....	61
Figura 4.18 - Placa de 19 mm de contraplacado antes da sua inserção na estrutura interna da PSM com pormenor da espessura e características da placa (à direita); Placa de 19 mm de MDF antes da sua inserção na estrutura interna da PSM com pormenor da espessura e características da placa (à esquerda) [Fotos do Autor]	62
Figura 4.19 - Inserção da tira de esponja na frincha inferior da porta inicial <i>Standard</i> (à esquerda); Pormenor da espessura da tira de esponja, 10 mm (à direita) [Fotos do autor] ...	63
Figura 4.20 - Esquema (sem escala) das câmaras reverberantes com a posição e orientação dos microfones (A, B e C) e das fontes sonoras F, para avaliação da influência da frincha inferior da porta <i>Standard</i>	64
Figura 4.21 - Esquema (sem escala) dos pontos de posicionamento dos microfones e das fontes sonoras, em ambas as câmaras reverberantes, R1 - recetora e E1 - emissora (corte horizontal)com respetivas distâncias relativas (em cima), com identificação dos pontos doo microfones e direccionalidade das fontes sonoras (em baixo)	65
Figura 4.22 - Curva dos valores de referência para sons de condução aérea para banda de frequência de 1/3 de oitava [8]	70
Figura 5.1 - Tempos de reverberação médios em função da frequência (bandas de 1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz), da câmara recetora R1.....	71
Figura 5.2 - Valores da redução sonora (<i>R</i>)da parede de gesso cartonado entre as câmaras reverberantes e curva de referência da norma NP EN ISO 717-1 [8], para cada frequência (banda de 1/3 oitava, dos 100 aos 5000 Hz)	74

Figura 5.3 - Valores dos níveis de pressão sonora (L_p), para cada banda 1/3 de oitava (100 aos 5000 Hz), medidos na câmara recetora R1, para avaliação do efeito da colmatação da frincha inferior (teste não normalizado), com o “tapa-frinchas” de esponja (Fig. 4.19) no isolamento sonoro a ruídos de condução aérea, na porta <i>Standard</i> (PS)	75
Figura 5.4 - Níveis de pressão sonora (L_p), na câmara recetora R1, para cada banda 1/3 de oitava (100 aos 5000 Hz), medidos na avaliação e comparação entre “tapa-frinchas” comerciais e o “tapa-frinchas” de esponja adaptado (teste não normalizado), nos valores de isolamento sonoro a ruídos aéreos da porta <i>Standard</i> (PS)	76
Figura 5.5 - Valores de redução sonora, R (dB), das portas <i>Standard</i> (PS) e <i>Standard</i> Melhorada (PSM), com e sem o “tapa-frinchas” de esponja adaptado (Fig. 4.19), para cada banda de frequência (1/3 oitava, dos 100 aos 5000 Hz)	78
Figura 5.6 - Valores de redução sonora R (dB), da porta <i>Standard</i> Melhorada (PSM) com diferentes composições internas (Quadro 4.3) e da porta <i>Standard</i> (PS), ambas com “tapa-frinchas” de esponja, para cada banda de frequência (1/3 oitava, dos 100 aos 5000 Hz)	82
Figura 5.7 - Ampliação dos valores de redução sonora R (dB), da porta <i>Standard</i> Melhorada (PSM) com as diferentes composições internas (Quadro 4.3) e da porta <i>Standard</i> (PS), ambas com “tapa-frinchas” de esponja, para as bandas de baixa frequência (1/3 oitava, dos 100 aos 500 Hz)	82
Figura 5.8 - Valores do índice de redução sonora R_w (dB) em função da massa por unidade de área m (kg/m ²) das diferentes portas avaliadas (Quadro 4.3) e respetiva aproximação logarítmica (portas TRANCAR®: $R_w = 44,7 \times \log(m) - 46,4$); e portas da concorrência: $R_w = 27,1 \times \log(m) + 6,1$, resultante da análise dos vários catálogos de portas acústicas no mercado (subcapítulo 3.1)	84
Figura A.1 - Resultados da redução sonora da porta <i>Standard</i> , sem o “tapa-frinchas” de esponja, para cada banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz) e curva de referência adotada da NP EN ISO 717-1 [8]	94
Figura A.2 - Resultados da redução sonora da porta <i>Standard</i> , com o “tapa-frinchas” de esponja, para cada banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz) e curva de referência adotada da NP EN ISO 717-1 [8]	95
Figura A.3 - Resultados da redução sonora da PSM* + Agl, sem o “tapa-frinchas” de esponja, para cada banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz) e curva de referência adotada da NP EN ISO 717-1 [8]	96
Figura A.4 - Resultados da redução sonora da PSM* + Agl, com o “tapa-frinchas” de esponja, para cada banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz) e curva de referência adotada da NP EN ISO 717-1 [8]	97
Figura A.5 - Resultados da redução sonora da PSM* + Agl+ Flex, com o “tapa-frinchas” de esponja, para cada banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz) e curva de referência adotada da NP EN ISO 717-1 [8]	98
Figura A.6- Resultados da redução sonora da PSM* + Agl+ EPDM, com o “tapa-frinchas” de esponja, para cada banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz) e curva de referência adotada da NP EN ISO 717-1 [8]	99
Figura A.7 - Resultados da redução sonora da PSM* + PENA, com o “tapa-frinchas” de esponja, para cada banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz) e curva de referência adotada da NP EN ISO 717-1 [8]	100

Figura A.8 - Resultados da redução sonora da PSM* + CP, com o “tapa-frinchas” de esponja, para cada banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz) e curva de referência adotada da NP EN ISO 717-1 [8] 101

Figura A.9 - Resultados da redução sonora da PSM* + MDF, com o “tapa-frinchas” de esponja, para cada banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz) e curva de referência adotada da NP EN ISO 717-1 [8] 102

Índice de Quadros

Quadro 2.1 - Celeridades de diferentes meios de propagação e temperaturas (°C) [18]	7
Quadro 2.2 - Exemplos de níveis de pressão sonora para situações comuns [17]	9
Quadro 2.3 - Valores da ponderação A, em dB, para banda de frequência 1/1 e 1/3 de oitava [16]	15
Quadro 2.4 - Condições de audibilidade e qualidade do isolamento sonoro através de um elemento construtivo [14].....	21
Quadro 2.5 - Valores de massa volúmica do elemento, fator de perdas internas, e celeridade de ondas longitudinais, para alguns materiais mais comuns [adaptado de 14].....	23
Quadro 3.1 - Valores limite mínimos do índice de isolamento sonoro a ruídos aéreos padronizado, com o exterior (para fachadas, empenas e coberturas), $D_{2m,nT,w}$, legislação portuguesa (RRAE 2008) [adaptado de 44]	42
Quadro 3.2 - Valores limite mínimos do índice de isolamento sonoro a ruídos aéreos, DnT,w , entre locais do estabelecimento de ensino, segundo artigo 7º do RRAE 2008 [44]	43
Quadro 3.3 - Valores limite mínimos do índice de isolamento sonoro a ruídos aéreos, DnT,w , entre locais do edifício, segundo artigo 8º do RRAE 2008 [44].....	43
Quadro 3.4 - Valores mínimos de índice de redução sonora para componentes exteriores, para diferentes tipos de edifícios, legislação Austríaca [adaptado de 48]	44
Quadro 3.5 - Valores mínimos do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea, entre componentes interiores de edifícios, legislação Austríaca [adaptado de 48].....	45
Quadro 3.6 - Valores mínimos do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado (DnT,A) para estabelecimentos de ensino, legislação Francesa [adaptado de 49]	46
Quadro 3.7 - Valores índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado (DnT,A) para estabelecimentos de saúde, legislação Francesa [adaptado de 49]	46
Quadro 3.8 - Valores mínimos do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado (DnT,A) para edifícios escolares, legislação Holandesa [adaptado de 50]	47
Quadro 3.9 - Valores de diferença no isolamento, com ou sem elemento de comunicação, e valores limite com o elemento de comunicação, entre os países em estudo [44, 46, 48, 49]	48
Quadro 4.1 - Instrumentação utilizada nas medições laboratoriais do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea	50
Quadro 4.2 - Dimensões da porta <i>Standard</i>	54
Quadro 4.3 - Composição interna e características das amostras de porta testadas	60
Quadro 4.4 - Posição e alturas (m) dos microfones, segundo os pontos A, B e C marcados na figura 4.20, para os ensaios com a frincha inferior da porta <i>Standard</i> selada (s/ frincha inferior) e com a frincha destapada (c/ frincha inferior)	63

Quadro 4.5 - Descrição dos materiais “tapa-frinchas” comerciais utilizados para avaliação e comparação do efeito da colmatação da frincha inferior da porta inicial <i>Standard</i> [Fotos adaptadas de 16]	64
Quadro 4.6 - Posição dos microfones (Fig. 4.21), e alturas, em ambas as câmaras reverberantes, para cada ensaio.....	66
Quadro 4.7 - Valores da curva de referência e níveis de pressão sonora $L_{i,j}$ para os espectros de adaptação nº 1 (<i>C</i>) e nº 2 (<i>Ctr</i>), nas bandas de 1/3 de oitava, para ruídos de condução aérea [adaptado de 8]	69
Quadro 5.1 - Tempos de reverberação médios e absorção sonora equivalente, na câmara recetora R1, calculada pela fórmula de Sabine (expressão 2.30), em função da frequência (bandas de 1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz).....	72
Quadro 5.2 - Níveis de pressão sonora do ruído de fundo, L_r (dB), na câmara recetora R1, para cada frequência bandas de 1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz)	73
Quadro 5.3 - Resultados dos ensaios para medição do índice de redução sonora R_w da parede de fecho entre as câmaras reverberantes (referência)	74
Quadro 5.4 - Valores da redução sonora, R (dB), para banda de frequência (1/3 de oitava, dos 100 aos 5000 Hz); índice de redução sonora R_w (dB); termos de adaptação espectral C e Ctr (dB) e respetivas diferenças aritméticas, da porta <i>Standard</i> (PS) com e sem o “tapa-frinchas” de esponja adaptado (Fig. 4.19).....	77
Quadro 5.5 - Valores da redução sonora, R (dB), para banda de frequência (1/3 de oitava, dos 100 aos 5000 Hz); índice de redução sonora R_w (dB); termos de adaptação espectral C e Ctr (dB) e respetivas diferenças aritméticas, da porta <i>Standard</i> Melhorada com o <i>Aglomerado 120kg</i> (PSM+Agl) com e sem o “tapa-frinchas” de esponja adaptado (Fig. 4.19)	79
Quadro 5.6- Valores da redução sonora, R (dB), para banda de frequência (1/3 de oitava, dos 100 aos 5000 Hz); índice de redução sonora R_w (dB); termos de adaptação espectral C e Ctr (dB) e respetivas diferenças aritméticas, da porta <i>Standard</i> (PS) e porta <i>Standard</i> Melhorada com o <i>Aglomerado 120kg</i> (PSM+Agl) sem o “tapa-frinchas” de esponja adaptado (Fig. 4.19) .	80
Quadro 5.7- Valores da redução sonora, R (dB), para banda de frequência (1/3 de oitava, dos 100 aos 5000 Hz); índice de redução sonora R_w (dB); termos de adaptação espectral C e Ctr (dB) e respetivas diferenças aritméticas, da porta <i>Standard</i> Melhorada (PSM*) com as diferentes composições internas (Quadro 4.3) e com o “tapa-frinchas” de esponja adaptado (Fig. 4.19)	81
Quadro 6.1 - Efeito da colmatação da frincha inferior da porta <i>Standard</i> (PS) - valores síntese ($L_{p,soma}$ (dB), soma logarítmica do nível de pressão sonora, na câmara recetora R1, de todas as bandas de frequência 1/3 oitava), e diferenças aritméticas relativas à situação sem “tapa-frinchas” (PS s/ “tapa-frinchas”).....	86
Quadro 6.2 - Avaliação do efeito da frincha inferior - valores síntese (índice de redução sonora R_w , diferenças aritméticas entre os índices de redução sonora ΔR_w e termos de adaptação espectral C e Ctr) dos ensaios normalizados, e valores das massas superficiais, da porta <i>Standard</i> (PS) e da porta <i>Standard</i> Melhorada com a placa de <i>Aglomerado 120kg</i> (PSM+Agl)..	87
Quadro 6.3 - Efeito das diferentes Valores síntese composições internas (apresentadas no quadro 4.3) da porta <i>Standard</i> Melhorada (PSM) - valores síntese (índice de redução sonora R_w , diferenças aritméticas entre os índices de redução sonora ΔR_w relativas à PS* e termos de	

adaptação espectral C e C_{tr}) dos ensaios normalizados e valores das respectivas massas superficiais m	88
Quadro A.1 - Resultados detalhados da porta <i>Standard</i> , sem o “tapa-frinchas” de esponja adaptado, para cálculo da redução sonora em função da banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz), do índice de redução sonora R_w e respetivos termos de adaptação espectral C e C_{tr}	93
Quadro A.2 - Resultados detalhados da porta <i>Standard</i> , com o “tapa-frinchas”, para cálculo da redução sonora em função da banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz), do índice de redução sonora R_w e respetivos termos de adaptação espectral C e C_{tr}	94
Quadro A.3 - Resultados detalhados da PSM + Agl, sem o “tapa-frinchas”, para cálculo da redução sonora em função da banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz), do índice de redução sonora R_w e respetivos termos de adaptação espectral C e C_{tr}	95
Quadro A.4 - Resultados detalhados da PSM* + Agl, com o “tapa-frinchas”, para cálculo da redução sonora em função da banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz), do índice de redução sonora R_w e respetivos termos de adaptação espectral C e C_{tr}	96
Quadro A.5 - Resultados detalhados da PSM* + Agl + Flex, com o “tapa-frinchas”, para cálculo da redução sonora em função da banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz), do índice de redução sonora R_w e respetivos termos de adaptação espectral C e C_{tr}	97
Quadro A.6 - Resultados detalhados da PSM* + Agl + EPDM, com o “tapa-frinchas”, para cálculo da redução sonora em função da banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz), do índice de redução sonora R_w e respetivos termos de adaptação espectral C e C_{tr}	98
Quadro A.7 - Resultados detalhados da PSM* + PENA, com o “tapa-frinchas”, para cálculo da redução sonora em função da banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz), do índice de redução sonora R_w e respetivos termos de adaptação espectral C e C_{tr}	99
Quadro A.8 - Resultados detalhados da PSM* + CP, com o “tapa-frinchas”, para cálculo da redução sonora em função da banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz), do índice de redução sonora R_w e respetivos termos de adaptação espectral C e C_{tr}	100
Quadro A.9 - Resultados detalhados da PSM* + MDF, com o “tapa-frinchas”, para cálculo da redução sonora em função da banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz), do índice de redução sonora R_w e respetivos termos de adaptação espectral C e C_{tr}	101

Lista de Símbolos e Abreviaturas

Símbolos:

- A - Absorção sonora equivalente [m^2]
 B - Módulo de rigidez à flexão [$\text{kg.m}^2/\text{s}^2$]
 c - Celeridade [m/s]
 C - Termo de adaptação espectral a ruído rosa, ponderado com filtro A [dB]
 c_L - Velocidade de propagação das ondas longitudinais no elemento [m/s]
 C_{tr} - Termo de adaptação espectral a ruído de tráfego, ponderado com filtro A [dB]
 d - Distância entre dois elementos [m]
 E - Módulo de elasticidade (ou de Young) [Pa]
 f - Frequência [Hz]
 f_0 - Frequência central da banda [Hz]
 f_0 - Frequência de ressonância do conjunto [Hz]
 f_1 - Frequência inferior da banda [Hz]
 f_2 - Frequência superior da banda [Hz]
 f_c - Frequência crítica [Hz]
 f_i - Frequência de ressonância de cavidade [Hz]
 h - Espessura do elemento [m]
 I - Intensidade sonora [W/m^2]
 I_0 - Intensidade sonora de referência [W/m^2]
 $K_{A,i}$ - Valor de ponderação A [dB]
 L - Nível de pressão sonora corrigido, sem ruído de fundo [dB]
 L_1, L_2, \dots, L_n - Níveis de pressão sonora de cada medição n [dB]
 L_E - Nível de pressão sonora da câmara emissora [dB]
 L_I - Nível de intensidade sonora [dB]
 L_p - Nível de pressão sonora [dB]
 L_r - Nível de pressão sonora do ruído de fundo [dB]
 L_R - Nível de pressão sonora da câmara recetora [dB]
 L_W - Nível de potência sonora [dB]
 L_{eq} - Nível de pressão sonora contínuo equivalente [dB]
 L_{pA} - Nível sonoro ponderado com filtro A [dB]
 L_{pm} - Média do nível de pressão sonora na superfície S [dB]

L_{f+r} - Nível de pressão sonora (fontes + ruído de fundo) [dB]

$L_{p,soma}$ - Nível de pressão sonora total [dB]

m - Massa por unidade de área [kg/m²]

P - Potência sonora incidente [W]

p - Pressão sonora [Pa]

p_0 - Pressão sonora de referência [Pa]

P_0 - Potência sonora de referência [W]

P_d - Potência sonora dissipada [W]

P_r - Potência sonora refletida [W]

P_t - Potência sonora transmitida [W]

$p(t)$ - Pressão sonora eficaz medida no tempo t [Pa]

p_{rms} - Pressão sonora eficaz [Pa]

R - Redução sonora [dB]

r - Distância à fonte sonora [m]

R_0 - Redução sonora para incidência perpendicular [dB]

R_m - Redução sonora média [dB]

R_w - Índice de redução sonora ponderado [dB]

R_{conj} - Redução sonora do conjunto parede e porta [dB]

R_{marg} - Redução sonora da parede tripla de gesso cartonado (entre as câmaras reverberantes) [dB]

S - Área superficial da amostra [m²]

S_0 - Superfície de referência [m²]

STC - *Sound transmission class* [dB]

T - Tempo de integração (em geral, entre 10-30 segundos para máquinas e equipamentos, 8 horas para ruído em espaços de trabalho)

t - Tempo [s]

TR - Tempo de reverberação [s]

V - Volume do compartimento ou da câmara reverberante [m³]

α_i - Coeficiente de absorção sonora do material i

ρ_{elem} - Peso específico do elemento [kg/m³]

τ_i - Coeficiente de transmissão sonora do elemento i

τ_m - Coeficiente de transmissão sonora médio

ϑ_1 - Ângulo de incidência

ϑ_2 - Ângulo de refração

ϑ_c - Ângulo crítico

R - Constante específica dos gases [$J/(kg \cdot K)$]

ν - Coeficiente de Poisson

η - Fator de perdas internas

θ - Temperatura [K]

κ - Coeficiente adiabático

ρ - Peso específico [kg/m^3]

τ - Coeficiente de transmissão

ω - Frequência angular

Abreviaturas:

PS - Porta *Standard*

PSM - Porta *Standard* Melhorada

PSM+Agl - Porta *Standard* Melhorada com a placa de 20 mm de *Aglomerado 120kg*

PSM+Agl+Flex - Porta *Standard* Melhorada com a placa de 20 mm de *Aglomerado 120kg* e a tela de 4 mm de *Flexitect G+*

PSM+Agl+EPDM - Porta *Standard* Melhorada com a placa de 20 mm de *Aglomerado 120kg* e a tela de 4 mm de *EPDM 130 Negro*

PSM+PENA - Porta *Standard* Melhorada com a placa de 20 mm de *PENA 30 FR*

PSM+CP - Porta *Standard* Melhorada com a placa de 19 mm de contraplacado

PSM+MDF - Porta *Standard* Melhorada com a placa de 19 mm de MDF

1.

Objetivos e Descrição

1.1 Enquadramento do Tema

Acústica é uma palavra “emprestada” do grego “*ακοφειν*”, que significa “ouvir”, é portanto o estudo do som e o seu comportamento com o meio [12]. Nos finais do século XIX, um jovem físico professor na Harvard College, W. C. Sabine iniciou os seus primeiros estudos em acústica arquitetónica (ou de edifícios). Os primeiros trabalhos de Sabine começaram através de um pedido de C. W. Eliot (presidente da Harvard College) para solucionar os problemas acústicos do auditório do *Fogg Art Museum*. Aquando completado este trabalho, Sabine já tinha desenvolvido a sua primeira teoria sobre a absorção sonora dos materiais e a sua relação com o decaimento sonoro de uma sala e o tempo de reverberação, formulando a sua mais importante descoberta, a “Fórmula de Sabine” [13].

Até ao século XX, som e acústica referia-se apenas a vibrações elásticas e a ondas sonoras audíveis ao ser humano, no entanto, atualmente, existem grandes áreas da acústica que estudam vibrações e ondas sonoras não associadas, direta ou indiretamente, ao processo auditivo, e muitas vezes com frequências e intensidades abaixo ou acima dos limites audíveis do ser humano [12].

Atualmente, a qualidade do desempenho acústico no interior de um espaço é um parâmetro de grande importância na construção de edifícios sustentáveis, já que o ambiente acústico afeta todas as atividades, desde a produtividade dos funcionários em escritórios, ao desempenho de salas de concerto ou auditórios, até ao valor no mercado de apartamentos, condomínios e moradias. Como tal existe, dentro da Acústica, uma área que estuda a acústica de edifícios. Em ambiente doméstico, o ruído de vizinhança pode ser um dos principais problemas de uma habitação. Estima-se que dezenas de milhões de pessoas em todo mundo sejam afetadas diariamente por ruídos de vizinhança, o que pode, por vezes, levar a consequências trágicas [12].

A melhor defesa contra o ruído passa por assegurar que, na fase de conceção e durante a construção do edifício, são tomadas as medidas corretas e necessárias para minimizar a transmissão sonora entre as divisões. As soluções improvisadas, aplicadas *a posteriori* da construção do edifício, são geralmente menos eficazes e mais dispendiosas [12].

Num edifício existem principalmente dois tipos de ruídos, aqueles que se propagam pela estrutura do edifício, com origem na excitação mecânica direta sobre os elementos

construtivos, denominados de *ruídos de percussão*, e aqueles que se propagam pelo ar, denominados de *ruídos de condução aérea* [14].

As portas são um dos elementos construtivos responsáveis pelo isolamento sonoro a ruídos de condução aérea, como tal o estudo do seu comportamento acústico é de grande importância para se obter boa qualidade acústica no interior de um espaço. Os materiais usados na construção de portas são muito variados, desde madeira, metal (aço), vidro até materiais compósitos derivados do plástico.

Além dos materiais constituintes da porta, os sistemas de colmatação das frinchas periféricas e a própria instalação do aro e pré-aro afetam o seu isolamento sonoro, portanto o controlo da eficiência acústica e correta instalação destes componentes é também importante para garantir o melhor isolamento sonoro global possível.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal o estudo experimental, em câmara reverberante, de melhorias no isolamento sonoro, a ruídos de condução aérea, de portas exteriores. Para obter as melhorias no isolamento estudou-se a influência da utilização de diferentes materiais na estrutura interna da porta. Além disso estudou-se também a influência da frincha inferior da porta no isolamento sonoro global. Foram avaliados para cada composição interna da porta, seguindo os parâmetros das normas EN ISO 10140 (partes 1, 2, 4 e 5) [4-7] e NP EN 717-1 [8], a redução sonora R , para cada banda de frequência 1/3 de oitava dos 100 aos 5000 Hz, índice de redução sonora R_w e respetivos termos de adaptação espectral C e C_{tr} .

As medições foram realizadas nas câmaras reverberantes do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia e as portas e materiais utilizados foram fornecidos pelo fabricante de portas de segurança *TRANCAR*® [3], marca pertencente ao grupo *Augusto Moreira, Lda*.

1.3 Descrição do Documento

O presente trabalho está dividido em seis capítulos, organizados de forma a transmitir, de forma sequencial, os conhecimentos, resultados e conclusões obtidas ao longo do mesmo.

Em primeiro lugar, o capítulo “1. Objetivos e Descrição” dá-nos um enquadramento do tema, de forma a sensibilizar o leitor para a importância do isolamento sonoro das portas como elementos de construção. Este capítulo descreve ainda o objetivo deste trabalho bem como a organização do mesmo.

No segundo capítulo “2. Conceitos e Definições” apresentam-se os conceitos teóricos importantes para uma clara e fácil compreensão dos assuntos abordados ao longo do texto. Estes conceitos e definições são apresentados de forma gradual, ou seja, inicialmente descrevem-se os conceitos básicos e gerais de Acústica e, posteriormente, apresentam-se conceitos mais minuciosos intimamente relacionados com o tema deste trabalho.

O terceiro capítulo “3. Isolamento Sonoro a Ruídos Aéreos de Portas” apresenta, em primeiro lugar, uma pesquisa e análise de várias portas acústicas de fabricantes concorrentes para uma posterior comparação com as diferentes composições de portas da TRANCAR® [3] estudadas. Posteriormente, dá-se a conhecer alguns modelos teóricos de previsão do isolamento sonoro a ruídos aéreos, desenvolvidos até ao momento, bem como a sua aplicação a portas. Por fim, neste capítulo apresenta-se de que forma as portas, como elemento construtivo, afetam os requisitos mínimos de isolamento sonoro dos edifícios na legislação não só portuguesa, mas também de outros países (Áustria, Holanda e França), sobre o ruído nos edifícios.

De seguida, no quarto capítulo “4. Metodologia” inicialmente apresentam-se as condições de medição e descreve-se a estrutura das portas utilizadas bem como os materiais inseridos na composição interna das amostras estudadas. Apresentam-se também duas metodologias de ensaio, uma não normalizada com o objetivo de avaliar o efeito da colmatação da frincha inferior da porta e uma normalizada pelas EN ISO 10140 (partes 1, 2, 4 e 5) [4-7] e NP EN ISO 717-1 [8] com o objetivo de avaliar e comparar o isolamento sonoro das diferentes composições internas da porta. Finalmente, descreve-se o processo de cálculo para obtenção da redução sonora R para cada banda de frequência 1/3 de oitava (dos 100 aos 5000 Hz), do índice de redução sonora R_w e termos de adaptação espectral C e C_{tr} .

No quinto capítulo “5. Apresentação dos Resultados e Discussão” expõe-se os principais resultados obtidos em ambas as análises acompanhados de uma discussão detalhada sobre os mesmos.

Por fim, o sexto capítulo “6. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros” tem o objetivo de apresentar as conclusões obtidas após o tratamento e discussão dos resultados obtidos neste trabalho e de propor alguns possíveis desenvolvimentos futuros sobre esta temática.

2.

Conceitos e Definições

2.1. Definição de Som e Onda Sonora

Acústica é o estudo do som, mais propriamente o estudo da sua formação e propagação, bem como a sua percepção pelo ser humano e os seus impactos no ambiente e na saúde humana. Portanto, acústica é uma ciência interdisciplinar, que relaciona a física, especialmente mecânica de fluídos e mecânica clássica, psicologia, fisionomia humana e psicoacústica.

Fisicamente, o termo *som* refere-se a pequenas vibrações de pressão, dependentes do tempo e posição no espaço, que se propagam num meio elástico. Esse meio pode ser sólido, líquido ou gasoso. E a propagação do som é realizada através de ondas sonoras, pequenos movimentos recíprocos das partículas do meio que originam pequenas variações de pressão e densidade, ou seja, zonas de compressão e descompressão (Fig. 2.1). Ondas sonoras apesar de transportarem energia, não transportam matéria [15].

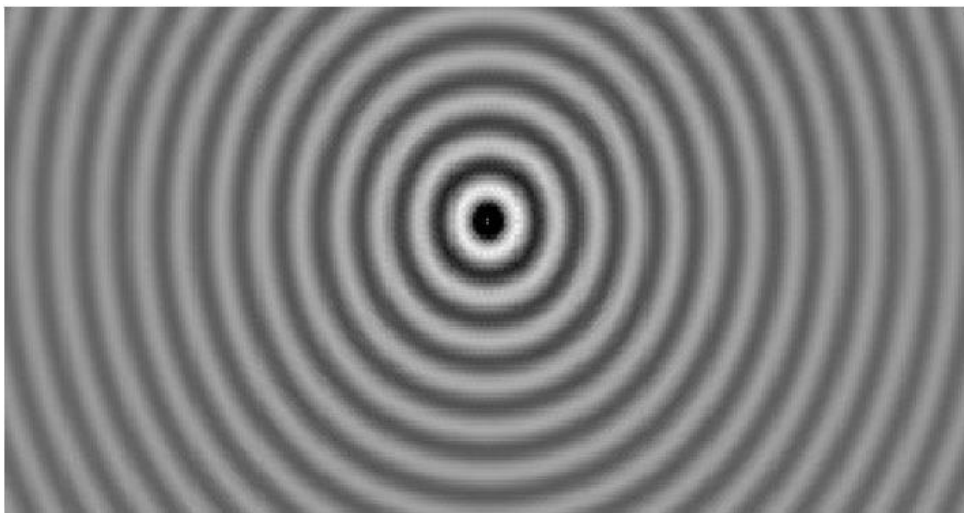


Figura 2.1 - Propagação de uma onda sonora com origem numa fonte pontual, alternância de zonas de compressão (escuro) com zonas de descompressão(claro) [15]

O som para que se propague é obrigatório a existência de um emissor, um meio de propagação e um recetor (Fig. 2.2).

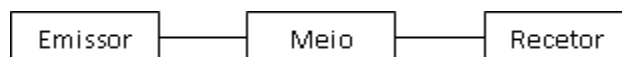


Figura 2.2 - Elementos necessários para a propagação do som [16]

O emissor é uma fonte sonora causada por diversos fenómenos, como vibrações mecânicas (ex.: vibrações de placas), ou variações de fluxos volumétricos de um fluido (ex.: explosões).

A definição do meio de propagação é importante para a determinar como o som se propaga. Como mencionado anteriormente, o meio pode ser sólido, líquido ou gasoso. Em fluidos, ou seja, líquidos e gases, que não são capazes de suportar forças de corte, o movimento das partículas realiza-se na mesma direção da propagação das variações de pressão (e densidade), originando ondas sonoras longitudinais. Em meios sólidos, além de ondas sonoras longitudinais, o som propaga-se através de ondas transversais, onde as partículas se movem perpendicularmente à direção de propagação das variações de pressão (e densidade) (Fig. 2.3) [17].

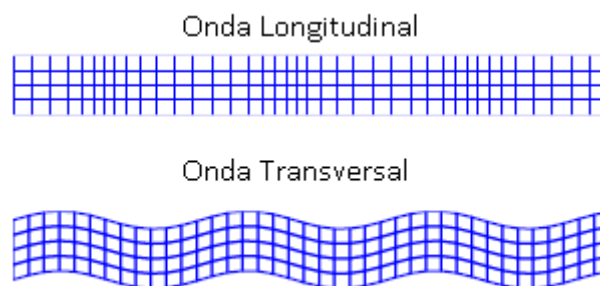


Figura 2.3 - Deformação do meio com a passagem de uma onda longitudinal (acima) e uma onda transversal (abaixo) (representação muito exagerada) [17]

A distinção entre *som* e *ruído* não é fisicamente possível, pois ambos são variações no espaço e tempo, da pressão e densidade do meio, associadas a movimentos recíprocos das partículas. No entanto, de forma geral, ruído pode ser definido como uma perturbação do meio sem significado auditivo para o recetor, na maioria das vezes originando desconforto no recetor e podendo estar associado a perturbações físicas e psicológicas.

As ondas sonoras, como são pequenas variações do meio elástico, podem ser descritas através de modelos matemáticos que associam equações da mecânica de fluidos e da termodinâmica. A equação mais simples, que descreve a variação no espaço e no tempo da pressão sonora em meio fluido, é a Equação da Onda (2.1).

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} p + \frac{\partial^2}{\partial y^2} p + \frac{\partial^2}{\partial z^2} p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} p \quad (2.1)$$

Sendo:

p - Pressão sonora (Pa);

x, y, z - Coordenadas cartesianas;

t - Tempo (s).

Esta equação é baseada em nos seguintes princípios:

- Conservação da massa num volume de controlo, ou seja, a quantidade de massa que entra e que sai é igual;
- 2ª Lei de Newton, onde a partícula de fluido é acelerada pela diferença de pressão em ambos os lados;
- Condições isentrópicas ($\Delta\dot{S} = 0$), ou seja, a entropia do sistema (volume de controlo) permanece constante, as variações de pressão e densidade ocorrem sem trocas de calor com o ambiente (mudanças de estado adiabáticas), e sem perdas por forças viscosas entre as partículas.

A contante c representa a *celeridade*, a velocidade de propagação das variações de pressão e densidade no meio que, assumindo que o meio de propagação é um gás ideal, pode-se relacionar com a equação dos gases ideais (2.2).

$$c^2 = \kappa \frac{p}{\rho}; p = \rho R \theta \rightarrow c^2 = \kappa R \theta \quad (2.2)$$

Sendo:

p - Pressão sonora (Pa);

ρ - Peso específico do meio (kg/m³);

κ - Coeficiente adiabático (ar $\approx 1,4$);

R - Constante específica do gás (ar ≈ 287 J/(kg. K);

θ - Temperatura do meio (K ou °C);

c - Celeridade (m/s).

O quadro 2.1 apresenta valores de celeridades para diferentes meios de propagação e temperatura.

Quadro 2.1 - Celeridades de diferentes meios de propagação e temperaturas (°C) [18]

Meio de Propagação e Temperatura	Celeridade [m/s]
Ar a 0°C	330
Ar a 20°C	342
Ar a -10°C	325
Água doce a 25°C	1497
Água salgada a 25°C	1560
Aço a 20°C	5000

A propagação das ondas sonoras num meio origina um campo sonoro. Este não depende apenas das propriedades da fonte sonora, tais como a potência sonora e direccionalidade, mas também das condições fronteira do meio, onde as ondas sonoras podem ser refletidas, absorvidas ou difundidas.

Como tal existem vários tipos de campo sonoro, sendo os mais comuns o campo sonoro livre e o campo sonoro difuso. Um campo sonoro livre é aquele onde as ondas sonoras não sofrem

quaisquer reflexões, ou difusões e sendo apenas absorvidas pelas partículas do meio, ou seja, é um campo sem qualquer fronteira. Um campo sonoro difuso é aquele onde a pressão sonora é uniforme, ou seja, as ondas refletidas são dominantes, e como tal pode-se assumir que a intensidade sonora é nula [19]. Na prática, utiliza-se o campo sonoro difuso em câmaras reverberantes para medições laboratoriais.

2.2. Parâmetros Acústicos

2.2.1. Pressão Sonora

No caso da propagação de som no ar, a pressão sonora é a diferença entre a pressão instantânea p_A total e a pressão atmosférica p_{atm} , sendo esta aproximadamente igual a 10^5 Pa. Na figura 2.4 está representada a variação temporal da pressão instantânea aquando da passagem de uma onda sonora. Durante o período de tempo marcado com “1” o meio está em repouso e como tal não existe som, no período seguinte, “2”, a pressão instantânea varia e como tal existe som. A pressão atmosférica está representada com o número “3” e um exemplo da variação de pressão sonora com o número “4”.

Os valores de variação da pressão sonora são muito pequenos comparativamente com a pressão atmosférica, por exemplo uma variação de pressão sonora de 50 Pa corresponde a um som extremamente forte, capaz de causar dor ao ser humano. O ser humano é capaz de ouvir uma grande gama de pressões sonoras, com um rácio de 1:1000000 [15].

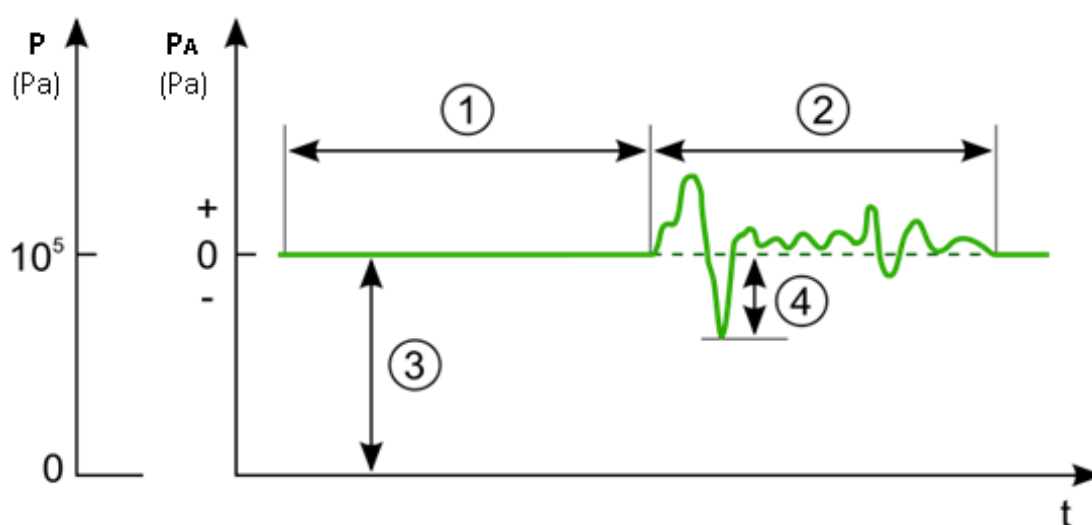


Figura 2.4 - Variação temporal da pressão instantânea do meio ao longo da passagem de uma onda sonora (“1”: período de tempo em que o meio está em repouso, ou seja, não existe som; “2”: período de tempo em que existe variação da pressão instantânea, como tal existe som; “3”: pressão atmosférica; “4”: variação da pressão sonora)[20]

A perceção da intensidade sonora pelo ouvido humano não é proporcional à amplitude da pressão sonora, mas segue uma escala logarítmica. Por esta razão e porque a gama de pressões sonoras audíveis é muito elevada, o valor de pressão sonora é expresso pelo nível de pressão sonora, relativo a um valor de referência, p_0 , (2.3).

$$L_p = 10 \log \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) \quad (2.3)$$

Sendo:

p - Amplitude de pressão sonora (Pa);

p_0 - Amplitude de pressão sonora de referência (Pa);

L_p - Nível de pressão sonora (dB).

A amplitude de pressão sonora de referência, $p_0 = 2 \times 10^{-5}$ Pa, corresponde aproximadamente ao mínimo perceptível pelo ser humano. É importante salientar que o nível de pressão sonora é adimensional, no entanto usualmente é utilizada a unidade auxiliar bel, B , ou o mais utilizado na prática, decibel, dB. No quadro 2.2 estão apresentados alguns exemplos de níveis de pressão sonora de situações comuns [17].

Quadro 2.2 - Exemplos de níveis de pressão sonora para situações comuns [17]

Situação	L_p [dB]
Sala em silêncio	20-30
Conversação normal, a 1 m	40-60
Televisão em intensidade normal, a 1 m	≈ 60
Automóvel, a 10m	60-80
Estrada movimentada, a 10m	80-90
Discoteca	90-110
Motor de avião, a 100m	110-140

Na presença de mais que uma fonte sonora num mesmo ambiente a pressão sonora total é igual à soma energética das pressões sonoras individuais. No entanto, o mesmo não acontece com os níveis de pressão sonora. Portanto, para calcular o nível de pressão sonora total, $L_{p,soma}$, é necessário primeiro converter os níveis de pressão sonora individuais, $L_{p,i}$, em amplitude de pressão sonora, de seguida somar os valores para obter a amplitude de pressão sonora total. Resumindo, este processo de adição de níveis de pressão sonora é uma soma logarítmica (2.4) [17].

$$L_{p,soma} = 10 \log \left(\sum_i 10^{L_{p,i}/10} \right) \quad (2.4)$$

Sendo:

$L_{p,soma}$ - Nível de pressão sonora total (dB);

$L_{p,i}$ - Nível de pressão sonora da fonte individual i (dB).

A partir da equação 2.4 é possível também determinar o nível de pressão sonora de uma fonte num ambiente ruidoso, medindo o nível de pressão sonora total (com a fonte) e medindo o nível de pressão sonora do ruído de fundo (sem fonte):

$$L_p = 10 \log \left(10^{L_{p,soma}/10} - 10^{L_r/10} \right) \quad (2.5)$$

Sendo:

$L_{p,soma}$ - Nível de pressão sonora total (dB);

L_p - Nível de pressão sonora (pretendido) (dB);

L_r - Nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB).

2.2.2. Potência sonora e Intensidade sonora

A potência sonora pode ser relacionada com a pressão eficaz, ou pressão *rms* (*root mean square*) (Fig. 2.5), se esta for medida a uma distância suficiente da fonte sonora (2.6). Normalmente nos métodos de medição, esta distância deverá ser no mínimo a 1 m da fonte. A pressão sonora eficaz é aquela que os sonómetros determinam e como tal é aquela que é importante avaliar [14].

$$P = \int \frac{p^2}{\rho c} dS = \frac{p_{rms}^2 S}{\rho c} \quad (2.6)$$

Sendo:

P - Potência sonora (W);

p - Amplitude de pressão sonora (Pa);

p_{rms} - Pressão sonora eficaz (Pa);

S - Superfície de integração (m^2);

ρ - Peso específico do meio (ar $\approx 1,2 \text{ kg/m}^3$);

c - Celeridade (m/s).

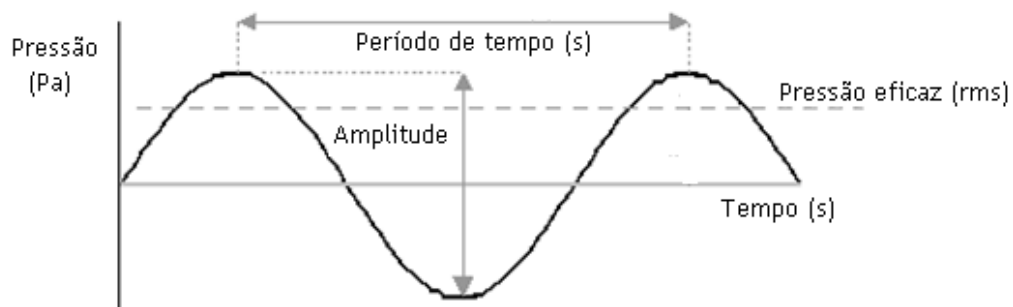


Figura 2.5 - Pressão eficaz (*rms* - *root mean square*) [adaptado de 16]

Por sua vez, assumindo uma superfície de integração esférica, pode-se verificar que a intensidade sonora e a potência sonora diminuem com a distância à fonte sonora (2.7).

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} = \frac{p_{rms}^2}{\rho c} \quad (2.7)$$

Sendo:

I - Intensidade sonora (W/m^2);

P - Potência sonora (W);

p_{rms} - Pressão sonora eficaz (Pa);

ρ - Peso específico do meio (ar $\approx 1,2 \text{ kg/m}^3$);

c - Celeridade (m/s);

r - Distância à fonte sonora (m).

Como demonstrado pela expressão 2.7, com uma fonte de potência sonora constante, quando a distância à fonte duplica ($r_2 = 2r_1$), a intensidade sonora diminui para um quarto ($I_2 = \frac{1}{4}I_1$) (Fig. 2.6) [16].

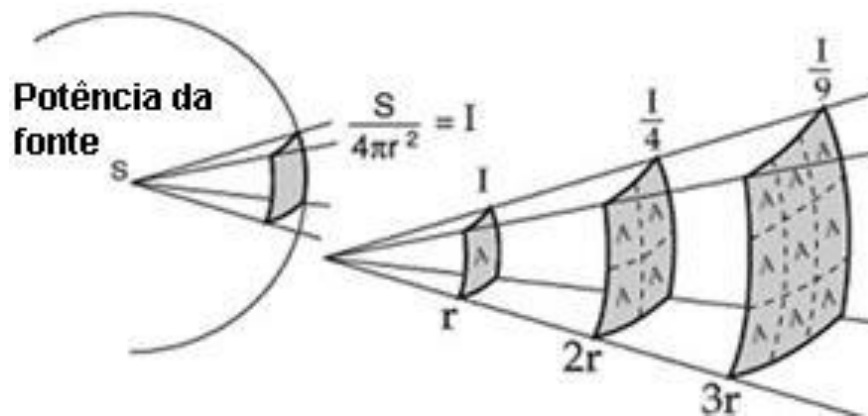


Figura 2.6 - Dependência da intensidade sonora com a distância à fonte [16]

Tal como a pressão sonora, a intensidade sonora e a potência sonora podem ser indicadas em níveis logarítmicos, (2.8) e (2.9).

$$L_I = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (2.8)$$

$$L_W = 10 \log \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (2.9)$$

Sendo:

L_I - Nível de intensidade sonora (dB);

L_W - Nível de potência sonora (dB);

I - Intensidade sonora (W/m^2);

I_0 - Intensidade sonora de referência ($= 10^{-12} \text{ W/m}^2$);

P - Potência sonora (W);

P_0 - Potência sonora de referência ($= 10^{-12} \text{ W}$).

Pela expressão 2.6 é possível também calcular o nível de potência sonora de uma fonte medindo apenas o nível de pressão sonora médio na superfície S na envolvente da fonte (2.10) [17].

$$L_W = L_{pm} + 10 \log \left(\frac{S}{S_0} \right) \text{ dB} \quad (2.10)$$

Sendo:

L_W - Nível de potência sonora (dB);

L_{pm} - Média do nível de pressão sonora na superfície S (dB);

S - Superfície envolvente da fonte sonora (m^2);

S_0 - Superfície de referência ($= 1 m^2$).

2.2.3. Frequência

Além da pressão sonora, a frequência é um parâmetro imprescindível para distinção de um som e avaliação da sua qualidade, a partir da qual o ouvido humano é capaz de distinguir se um som é mais grave ou agudo.

Frequência é definida como o número de ciclos completos de uma onda sonora, que ocorrem num intervalo de tempo de um segundo, expressa em hertz (Hz) (Fig. 2.7).

O ouvido humano comum é sensível a uma gama de frequências entre 20 Hz e 20.000 Hz, no entanto estes valores podem variar consideravelmente de indivíduo para indivíduo. Sons com frequência inferior a 20 Hz são demasiado graves para ouvido humano e são denominados infrassons, por sua vez, sons com frequência superior a 20.000 Hz são demasiado agudos para ouvido humano e são denominados ultrassons [17].

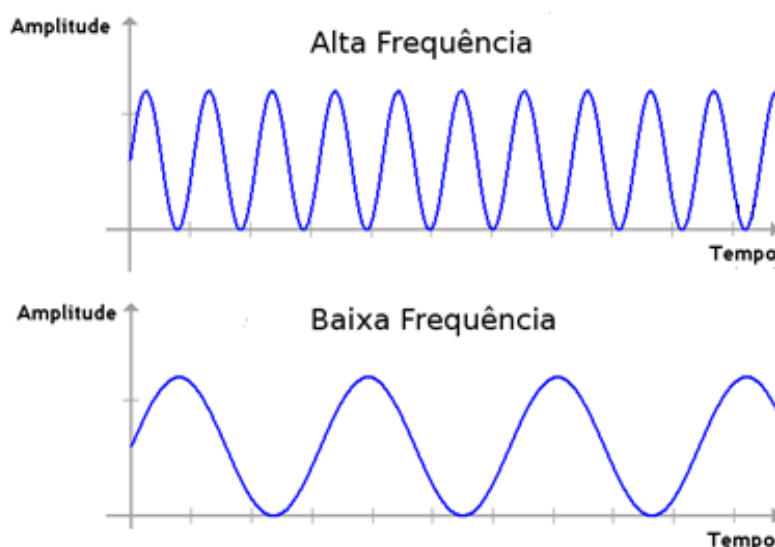


Figura 2.7 - Distinção entre ondas com alta e baixa frequência [21]

A maioria dos eventos sonoros não são sons puros, ou seja, com uma só frequência, mas sons complexos com mais que uma frequência ao mesmo tempo. Tal como descrito no subcapítulo 2.2.1, o quadrado da amplitude de pressão sonora de um som complexo pode ser calculado com a soma dos quadrados das amplitudes das pressões individuais em cada frequência (2.11).

$$p^2 = \sum_i p_i^2 \quad (2.11)$$

Sendo:

p - Amplitude de pressão sonora de som complexo (Pa);

p_i - Amplitude de pressão individual com frequência i (Pa).

Para análise completa de um som complexo é necessário a decomposição do seu espectro sonoro (Fig. 2.8) em cada um dos milhares de frequência individuais, no entanto este processo pode ser muito trabalhoso. Portanto, na prática, dividem-se as frequências por “bandas”, com uma frequência central e uma largura de banda, onde o quociente da diferença da frequência superior e inferior, ou seja, a largura de banda, e a frequência central é constante para todas as bandas, (2.12). [15]

$$\frac{f_2 - f_1}{f_0} = constante \quad (2.12)$$

Na prática as larguras de banda mais utilizadas são as bandas de oitava (1/1) ou de terço de oitava (1/3). Para as bandas de oitava a frequência superior é o dobro da frequência inferior, para as bandas de terço de oitava o quociente entre a frequência superior e inferior é igual a $2^{1/3}$.

Os limites superiores e inferiores de cada banda $1/n$ de oitava podem ser calculados pelas seguintes expressões (2.13) e (2.14)

$$f_1 = 2^{-1/2n} f_0 \quad (2.13)$$

$$f_2 = 2^{1/2n} f_0 \quad (2.14)$$

Sendo:

f_0 - Frequência central da banda (Hz);

f_1 - Frequência inferior da banda (Hz);

f_2 - Frequência superior da banda (Hz);

n - Constante de oitava (= 1 para banda de oitava e = 3 para banda de terço de oitava).

Os valores das frequências centrais para as bandas de oitava e terço de oitava estão normalizados para mais fácil comparação. Para 1/1 oitava são: 16, 31, 63, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k, 16k Hz. Para 1/3 de oitava os valores normalizados são: 20, 25, 31, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1k, 1250, 1600, 2k, 2.5 k, 3.15k, 4k, 5k, 6.3k, 8k, 10k, 12.5k, 16k, 20k.

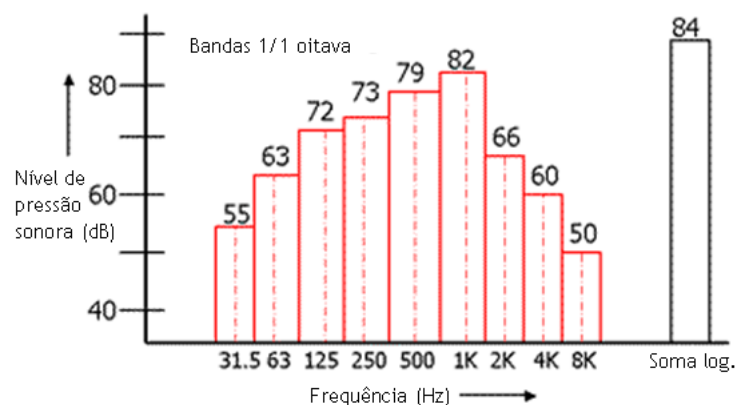


Figura 2.8 - Exemplo de um som complexo avaliado em banda de frequência de 1/1 oitava [adaptado de 22]

Apesar dos níveis de pressão sonora registarem a sensibilidade logarítmica do ouvido humano à pressão sonora, a real sensação de “volume sonoro” apresenta uma relação mais complexa com a frequência. O ouvido humano é mais sensível para frequências médias do que para os extremos das frequências audíveis (muito baixas ou muito altas). Esta relação pode ser descrita pelas curvas de igual sensibilidade (Fig. 2.9). Estas representam, em função da frequência, a variação do nível de pressão sonora necessário para que a sensação de “volume” pelo ouvido humano seja constante. Como esta é uma escala subjetiva usa-se uma unidade psicoacústica, o *fone*.

Para avaliar então a resposta do ouvido humano a esta relação são usadas as curvas de ponderação, ou também designados filtros A, B e C. Sendo o mais usado o filtro A (Fig. 2.10). O filtro A é usado para sons de fraca intensidade, aproximado à curva dos 40 *fone*, por sua vez o filtro C é utilizado para sons com grande intensidade sonora nas baixas frequências.

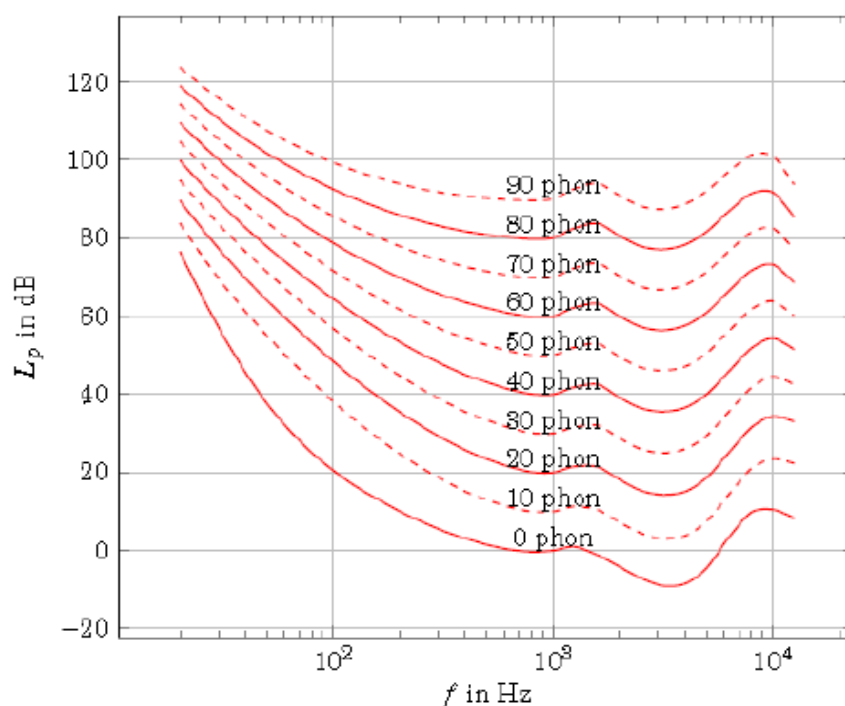


Figura 2.9 - Curvas de igual sensibilidade auditiva [17]

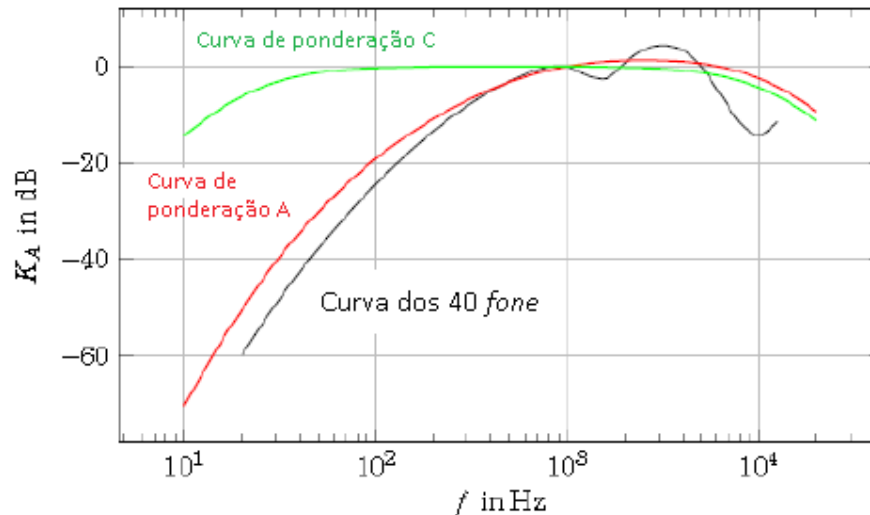


Figura 2.10 - Curvas de ponderação A e C [adaptado de 17]

Na prática, utiliza-se o nível sonoro L_{pA} , (2.15), onde, para cada banda de frequência, os valores captados de nível de pressão sonora adicionam-se os valores de ponderação A, $K_{A,i}$ (Quadro 2.3). Desta forma é possível traduzir a sensação de “volume” do ouvido humano às diferentes frequências [17].

$$L_{pA} = 10 \log \left(\sum_i 10^{\frac{L_{p,i} + K_{A,i}}{10 \text{ dB}}} \right) \quad (2.15)$$

Sendo:

L_{pA} - Nível sonoro ponderado com filtro A (dB);

$L_{p,i}$ - Nível de pressão sonora de cada banda de frequência i (dB);

$K_{A,i}$ - Valor de ponderação A para cada banda de frequência i (dB).

Quadro 2.3 - Valores da ponderação A, em dB, para banda de frequência 1/1 e 1/3 de oitava [16]

Banda de frequência (Hz)	Ponderação A para 1/3 de oitava (dB)	Ponderação A para 1/1 oitava (dB)	Banda de frequência (Hz)	Ponderação A para 1/3 de oitava (dB)	Ponderação A para 1/1 oitava (dB)
25	-44,7	-40	800	-0,8	0
31	-39,4		1.000	0	
40	-34,6		1.250	0,6	
50	-30,2		1.600	1,0	
63	-26,2	-26	2.000	1,2	1
80	-22,5		2.500	1,3	
100	-19,1		3.125	1,2	
125	-16,1		4.000	1,0	
160	-13,4	-15,5	5.000	0,5	1
200	-10,9		6.300	-0,1	
250	-8,6		8.000	-1,1	
315	-6,6		10.000	-2,5	
400	-4,8	-8,5	12.500	-4,3	-1
500	-3,2		16.000	-6,6	
630	-1,9		20.000	-9,3	

2.2.4. Tempo

A fontes sonoras estão sujeitas, por vezes, a grandes variações temporais, portanto para uma completa medição do som é necessário avaliar a sua variação no tempo. Desta forma é possível recorrer-se a parâmetros energéticos para avaliar um determinado som num intervalo de tempo [14].

Neste caso pode-se recorrer a uma média linear onde o valor de pressão eficaz é ponderado igualmente ao longo do intervalo de tempo. Este parâmetro é denominado nível de pressão sonora contínua equivalente (L_{eq}) (2.16).

$$L_{eq} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right) \quad (2.16)$$

Sendo:

L_{eq} - Nível de pressão sonora contínuo equivalente (dB);

$p(t)$ - Pressão sonora eficaz medida no tempo t (Pa);

p_0 - Pressão sonora de referência(= 2×10^{-5} Pa);

T - Tempo de integração (entre 10-30 segundos para máquinas e equipamentos, 8 horas para ruído em espaços de trabalho) [17].

2.3. Fenómenos de Transferência Sonora

2.3.1. Reflexão

O fenómeno de reflexão ocorre quando uma onda sonora encontra um obstáculo, muda de direção e a onda refletida sobrepõe-se à onda incidente. Se o meio sonoro está limitado de todos os lados, ocorrem reflexões consecutivas da onda sonora (Fig. 2.11).

Durante uma reflexão existe sempre perda da energia sonora no obstáculo, no entanto obstáculos com elevada dureza, por exemplo paredes de betão, mármore e azulejos, refletem quase 100% da energia sonora incidente [16].

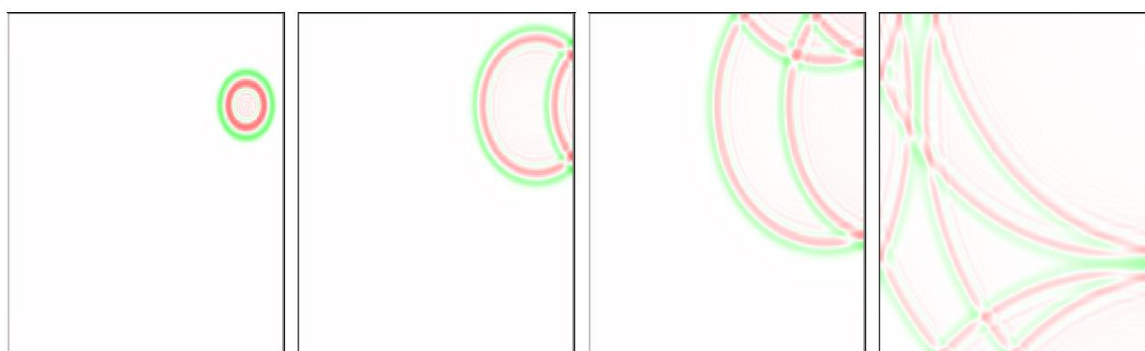


Figura 2.11 - Múltiplas reflexões de uma onda sonora num meio limitado por todos os lados [15]

2.3.2. Refração

Uma onda sonora refratada atravessa a fronteira entre dois meios com celeridades diferentes. A onda sonora, com um ângulo de incidência ϑ_1 , quando atravessa uma fronteira entre os dois meios diferentes é refratada e muda de direção com um ângulo de refração ϑ_2 (Fig. 2.12).

O ângulo de refração pode ser estimado usando a Lei de Refração de Snellius (2.17) [15].

$$\frac{\sin(\vartheta_1)}{\sin(\vartheta_2)} = \frac{c_1}{c_2} \quad (2.17)$$

A refração de uma onda sonora depende do ângulo crítico, ϑ_c , a partir do qual não existe refração e a onda sonora é completamente refletida (2.18) [15].

$$\vartheta_c = \arcsin\left(\frac{c_1}{c_2}\right) \quad (2.18)$$

Sendo:

ϑ_1 - Ângulo de incidência;

ϑ_2 - Ângulo de refração;

ϑ_c - Ângulo crítico;

c_1 - Celeridade do meio da onda incidente (m/s);

c_2 - Celeridade do meio da onda refratada (m/s).

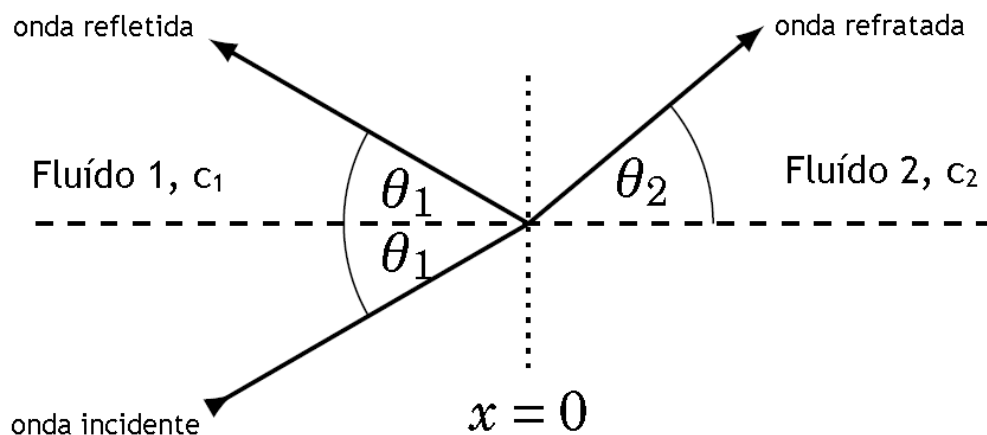


Figura 2.12 - Refração e reflexão de uma onda sonora na fronteira entre dois meios diferentes [adaptado de 17]

Resumidamente, quando uma onda sonora incide, obliquamente, numa fronteira entre dois meios com diferentes celeridades podem ocorrer três situações distintas:

- Se $c_1 > c_2 \rightarrow$ existe refração e $\vartheta_1 > \vartheta_2$;
- Se $c_1 < c_2$ e $\vartheta_1 < \vartheta_c \rightarrow$ existe refração e $\vartheta_1 < \vartheta_2$;
- Se $c_1 < c_2$ e $\vartheta_1 > \vartheta_c \rightarrow$ não existe refração apenas reflexão [15].

2.3.3. Reflexão Difusa

Reflexão difusa ocorre quando uma onda sonora incide numa superfície rugosa que reflete as ondas em várias direções (Fig. 2.13). O tamanho do relevo da superfície condiciona quais as frequências que são refletidas, ou seja, pequenos relevos refletem mais altas frequências e vice-versa [16].

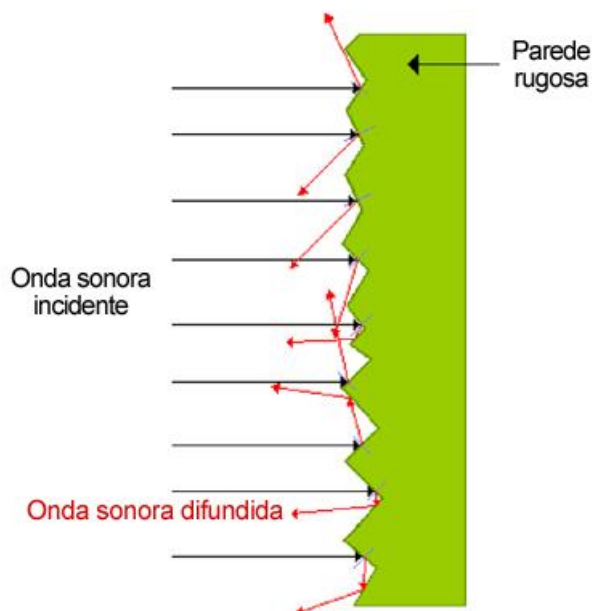


Figura 2.13 - Fenómeno de reflexão difusa de uma onda sonora numa superfície rugosa [22]

2.3.4. Difração

Difração pode ser definida como a deformação de uma onda sonora ao atravessar um obstáculo. Se o obstáculo é um plano sólido, por exemplo uma barreira acústica, as ondas sonoras são capazes de se difratar pelas arestas do obstáculo e, dependendo do comprimento da onda sonora, esta pode criar uma zona de “sombra” sonora do lado oposto da onda incidente (Fig. 2.14) [15].

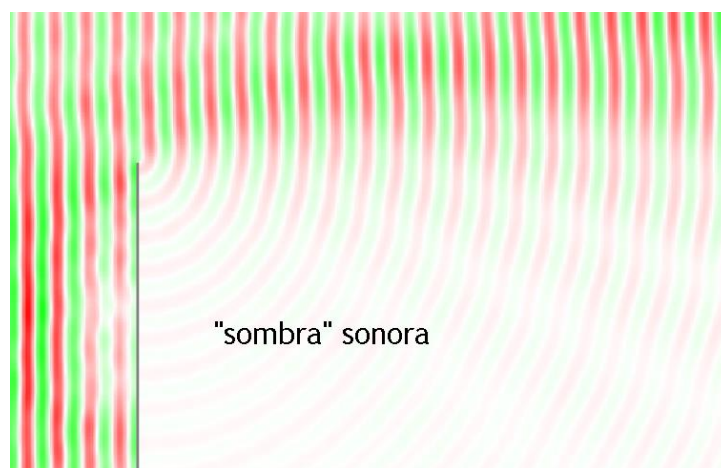


Figura 2.14 - Difração sonora num plano sólido e zona de “sombra” (claro) [15]

Por outro lado, se existir uma abertura no plano sólido, por exemplo uma frincha de uma porta, a onda sonora incidente “penetra” o campo sonoro adjacente ao plano (Fig. 2.15). Devido a este fenómeno, para uma boa insonorização é necessário que uma porta seja bem selada, porque qualquer abertura permitirá a entrada de som exterior. A difração depende da largura da abertura, quanto maior é a largura da abertura comparativamente com o comprimento de onda da onda sonora incidente, menor é a difração da onda sonora [23].

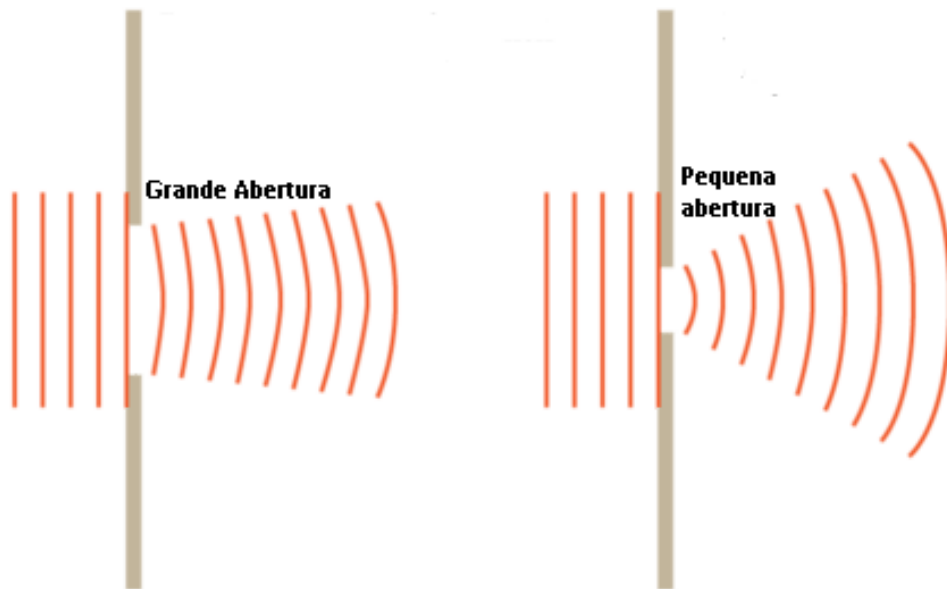


Figura 2.15 - Difração sonora por aberturas, grande abertura (esquerda) e pequena abertura (direita) comparativamente ao comprimento de onda [24]

2.4. Isolamento Sonoro

2.4.1. Isolamento a Ruídos Aéreos

2.4.1.1. Definições

Entre dois elementos construtivos pode existir a propagação de ruídos de condução aérea e ruídos de percussão. Ruídos de condução aérea são ondas sonoras com origem num meio fluído, mais vulgarmente no ar. Ruídos de percussão têm origem em excitações mecânicas pela fonte sobre os elementos construtivos (Fig. 2.16).

O isolamento sonoro a ruídos aéreos depende, em primeiro lugar, da consideração do isolamento de um só elemento (ex. parede, porta, etc.). No entanto, na maioria dos casos, depende da transmissão global entre dois espaços, o emissor e o recetor, onde se contabiliza não só o elemento separador, mas todo o comportamento acústico da estrutura envolvente, transmissões diretas e transmissões marginais.

A massa do elemento construtivo e/ou a duplicação física do material separador são as duas principais variáveis a alterar para aumentar o isolamento a ruídos de condução aérea [14].

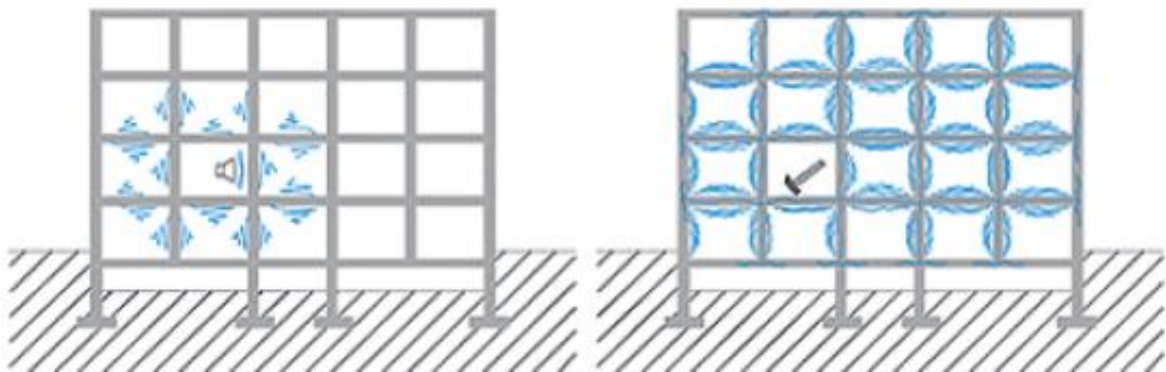


Figura 2.16 - Distinção entre ruídos de condução aérea (esquerda) e ruídos de percussão (direita) [25]

Para caracterizar o isolamento sonoro considera-se a incidência de uma onda sonora num obstáculo (ex. porta). Parte da potência sonora da onda incidente pode ser refletida, transmitida ou dissipada pelo obstáculo (Fig. 2.17).

O quociente entre a potência sonora transmitida e a potência sonora incidente é definido como o coeficiente de transmissão, τ (2.19 e 2.20).

$$P = P_r + P_t + P_d \quad (2.19)$$

$$\tau = \frac{P_t}{P} \quad (2.20)$$

Sendo:

P - Potência sonora incidente (W);

P_r - Potência sonora refletida (W);

P_t - Potência sonora transmitida (W);

P_d - Potência sonora dissipada (W);

τ - Coeficiente de transmissão.

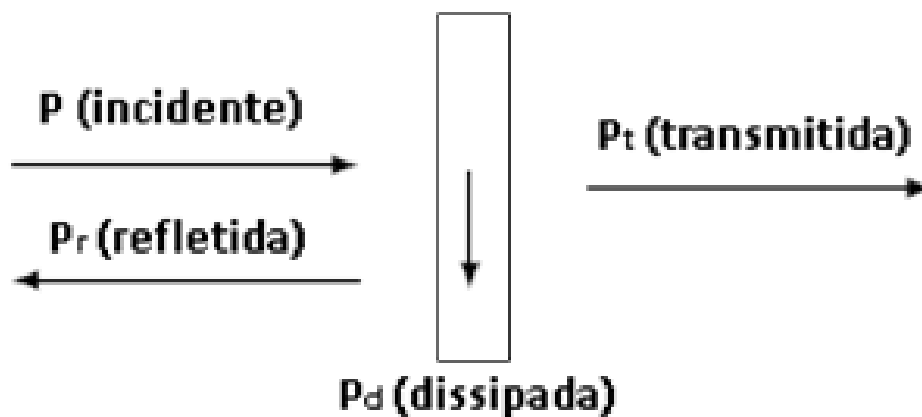


Figura 2.17 - Balanço de potências sonoras num elemento construtivo [adaptado de 15]

O isolamento sonoro a ruídos aéreos de um elemento é caracterizado pela redução sonora, R , (2.21).

$$R = -10 \log\left(\frac{P_t}{P}\right) = 10 \log\left(\frac{1}{\tau}\right) \quad (2.21)$$

Sendo:

R - Redução sonora (dB);

P - Potência sonora incidente (W);

P_t - Potência sonora transmitida (W);

τ - Coeficiente de transmissão.

Pela expressão 2.21 é possível verificar-se que uma elevada redução sonora implica um baixo coeficiente de transmissão, ou seja, implica que muito pouca energia sonora atravesse o elemento.

O quadro 2.4 apresenta uma qualificação subjetiva da qualidade do isolamento sonoro e das condições de audibilidade através de um elemento construtivo, entre dois espaços adjacentes.

Quadro 2.4 - Condições de audibilidade e qualidade do isolamento sonoro através de um elemento construtivo [14]

Isolamento Sonoro (dB)	Condições de Audibilidade	Conclusão
< 30	A voz normal pode ser compreendida com facilidade e de modo distinto	<i>Muito mau</i>
30 - 35	A voz é percebida fracamente. A conversa pode ser ouvida, mas não nitidamente compreendida	<i>Mau</i>
36 - 40	A voz pode ser ouvida, mas as palavras não são compreendidas com facilidade. A voz normal só será debilmente ouvida	<i>Sofrível</i>
41 - 45	A voz alta pode ser fracamente ouvida, mas sem ser compreendida. A conversação normal é audível	<i>Suficiente</i>
46 - 50	A voz alta pode ser ouvida com pouca dificuldade	<i>Bom</i>
51 - 55	Só sons muito intensos (TV, canto, etc.) podem ser ouvidos	<i>Muito bom</i>
56 - 60	Difícil ouvir até sons intensos. Só sons do tipo “discoteca” serão audíveis	<i>Excelente</i>

2.4.1.2. Elementos Simples

O isolamento sonoro de um elemento simples (por exemplo uma parede simples) depende de vários parâmetros: massa do elemento, frequência da onda sonora incidente, frequência crítica, fator interno de amortecimento, permeabilidade, rigidez, etc. [14].

Quando uma onda sonora atinge um elemento simples, a pressão sonora causa pequenos movimentos oscilatórios que, por sua vez, criam novas ondas sonoras do lado oposto à onda incidente (Fig. 2.18).

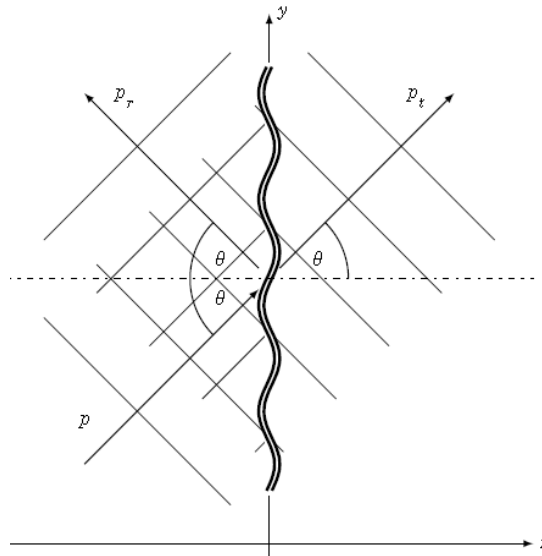


Figura 2.18 - Transmissão de uma onda sonora, com ângulo de incidência θ [adaptado de 15]

O comportamento acústico de um elemento pode ser dividido em duas principais gamas de frequência distintas, separadas pela frequência crítica do elemento, f_c . Esta corresponde à frequência que corresponde à coincidência entre as ondas sonoras incidentes e a própria vibração do elemento. A frequência crítica depende da elasticidade do elemento, da sua massa por unidade de área, da espessura e da celeridade do som no ar. Esta pode ser calculada pela expressão 2.22 [14].

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B}} \quad ; \quad B = \frac{E \cdot h^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (2.22)$$

De forma mais simplificada:

$$f_c = \frac{c^2}{1,8c_L h} \quad ; \quad c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho_{elem}}} \quad (2.23)$$

Sendo:

f_c - Frequência crítica (Hz);

c - Celeridade (m/s);

c_L - Velocidade de propagação das ondas longitudinais no elemento (m/s);

m - Massa por unidade de área (kg/m^2);

B - Módulo de rigidez à flexão ($\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$);

E - Módulo de elasticidade (ou de Young) (Pa);

h - Espessura do elemento (m);

ρ_{elem} - Peso específico do elemento (kg/m^3);

ν - Coeficiente de Poisson.

Valores para o cálculo da frequência crítica são apresentados no quadro 2.5, para alguns materiais mais usados como elementos construtivos.

Para frequências inferiores à frequência crítica, assumindo uma incidência perpendicular ao elemento, a redução sonora pode ser calculada por pela expressão 2.24 [17].

$$R_0 = 20 \log \left(\frac{\omega m}{2 \rho c} \right) \quad (2.24)$$

No entanto, na prática uma incidência das ondas sonoras perpendicular ao elemento não se justifica como realista. Para tal, assume-se a existência de um campo sonoro difuso, onde as ondas sonoras incidem o elemento uniformemente em todas as direções. Neste caso, a redução sonora pode ser calculada pela expressão 2.25.

$$R = R_0 - 10 \log(0,23 R_0) \quad (2.25)$$

Sendo:

R_0 - Redução sonora para incidência perpendicular num único elemento (dB);

R - Redução sonora, campo difuso, num único elemento (dB);

ω - Frequência angular ($= 2\pi f$);

m - Massa por unidade de área (kg/m^2);

c - Celeridade (m/s);

ρ -Peso específico do meio sonoro (kg/m^3).

Quadro 2.5 - Valores de massa volúmica do elemento, fator de perdas internas, e celeridade de ondas longitudinais, para alguns materiais mais comuns [adaptado de 14]

Material	Massa volúmica, $\rho_{elem} (\text{kg/m}^3)$	Fator de perdas internas, η	Celeridade de ondas longitudinais, $c_L (\text{m/s})$
Borracha	1000	0,1-1,0	1600
Cortiça	250	0,13-0,39	
Poliestireno expandido	14	2,0	300
Aço	7800	0,0001-0,01	5150-5500
Alumínio	2700	0,0001-0,01	5150
Chumbo	10600	0,02-0,15	1210
Vidro	2500	0,0006-0,02	5200-5500
Vidro acrílico (<i>plexiglass</i>)	1150-1200	0,002-0,040	1800
Alvenaria	900	0,005-0,02	2300
Tijolo maciço	2000-2500	0,01	3000
Tijolo furado	1300	0,003-0,010	2200-2500
Betão	2100-2300-2400	0,005-0,020	3500-3850
Betão poroso (leve)	600-1400	0,010-0,015	1700
Gesso	1000	0,004	
Gesso cartonado	760	0,006-0,030	1600-1860
Madeira (abeto)	550-600	0,04	3800-5400 (depende da espécie)
Madeira (teca)	900	0,02	
Madeira (choupo)	500	0,04	
Madeira (pinho)	480	0,008	
Contraplacado	600 700	0,01-0,02 0,005-0,01	2500-3800
Contraplacado denso	1000	0,005-0,01	2000

Na vizinhança da frequência crítica existe o efeito de coincidência e a redução sonora é mínima. Para frequências superiores à frequência crítica a redução sonora volta a aumentar com a frequência. No entanto, dependendo do fator de perdas internas, η (quadro 2.5), a redução sonora pode ou não ser superior à atingida para frequências inferiores à frequência crítica. A redução sonora, para este caso, pode ser calculada pela expressão 2.26 [17]

$$R = 20 \log \left(\frac{\omega m''}{2\rho c} \right) + 10 \log \left(\frac{f}{f_c} \right) + 10 \log \left(\frac{2\eta}{\pi} \right) \quad (2.26)$$

Sendo:

R - Redução sonora, campo difuso, num único elemento (dB);

ω - Frequência angular ($= 2\pi f$);

m - Massa por unidade de área (kg/m^2);

c - Celeridade (m/s);

ρ - Peso específico do meio sonoro (kg/m^3);

f_c - Frequência crítica (Hz);

f - Frequência da onda incidente (Hz);

η - Fator de perdas internas.

Em resumo (Fig. 2.19):

- para frequências inferiores à frequência crítica ($f < f_c$), a redução sonora aumenta 6 dB por oitava, e também aumenta 6 dB por duplicação da massa do elemento, conhecida por *Lei da Massa*;
- para frequências imediatamente na vizinhança da frequência crítica ($f \approx f_c$), a redução sonora decresce abruptamente, dependendo do fator de perdas internas η ;
- para frequências superiores à frequência crítica ($f > f_c$), a redução sonora aumenta 9 dB por oitava.
-

2.4.1.3. Elementos Duplos

Como o aumento da redução sonora de um elemento simples seria acompanhado do aumento a sua massa, para obter reduções elevadas são necessários elementos muito pesados, o que nem sempre é prático. Uma solução para este problema é a construção de elementos duplos, compostos por dois elementos, de igual massa ou massas distintas, separados por uma distância d , preenchida com ar ou material absorvente sonoro. Normalmente, estas dois elementos apenas estão firmemente fixos em alguns pontos, para evitar propagação de som pelos fixadores [17].

O comportamento acústico de elementos duplos depende da frequência de ressonância de todo o conjunto, f_0 , onde o conjunto entra em ressonância com a onda sonora incidente e a redução sonora é mínima, e das frequências às quais existe ressonâncias de cavidade, $f_{rc,i}$.

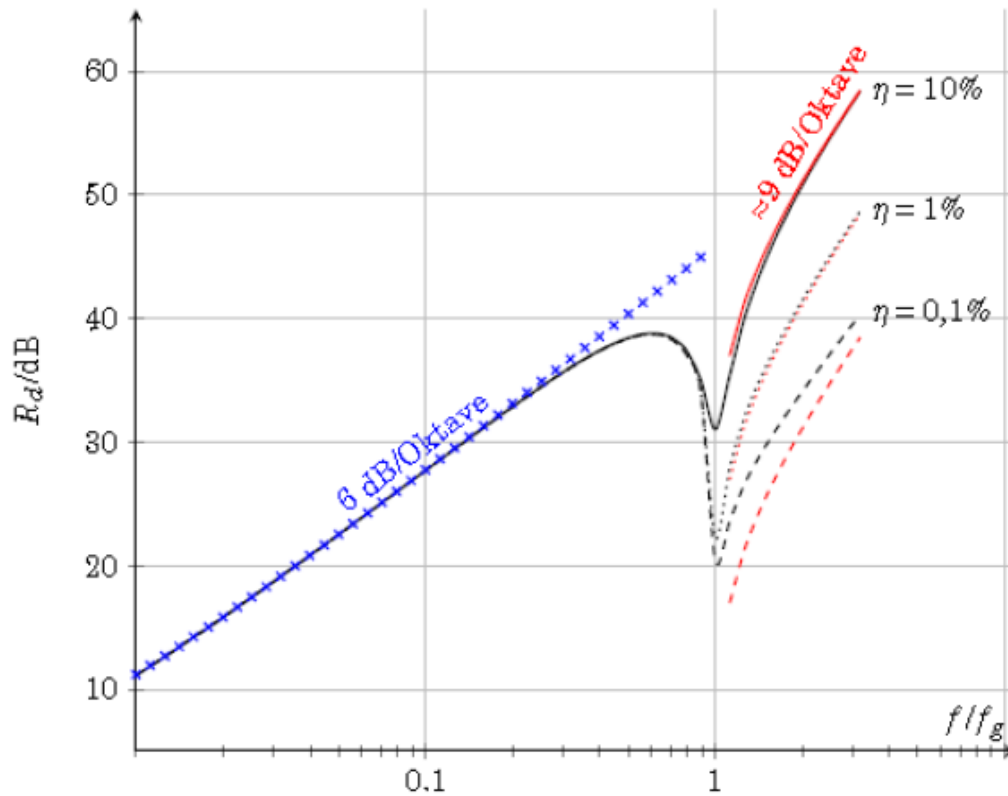


Figura 2.19 - Dependência da redução sonora (R), para campo difuso, de uma placa de alumínio de 1 mm de espessura, com a frequência de incidência [17]

A frequência de ressonância depende das massas dos elementos constituintes e da distância entre eles, e pode ser calculada através da expressão 2.27 [17].

$$f_0 = K \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{d \cdot m_1 \cdot m_2}} \quad (2.27)$$

Sendo:

f_0 - Frequência de ressonância do conjunto (Hz);

m_1 - Massa por unidade de área do 1º elemento (kg/m^2);

m_2 - Massa por unidade de área do 2º elemento (kg/m^2);

d - Distância entre os dois elementos (m);

$K = 60$, com apenas ar entre os elementos, ou $= 43$, se espaço preenchido com material absorvente sonoro.

As ressonâncias de cavidade têm origem nos fenómenos estacionários das ondas sonoras quando refletidas entre os dois elementos do conjunto, denominadas ondas estacionárias (Fig. 2.20). Estes fenómenos ocorrem para altas frequências, onde múltiplos do comprimento de onda coincidem com a distância entre os dois elementos. Estas frequências podem ser calculadas pela expressão 2.28 [14].

$$f_{rc,i} = \frac{c \cdot n}{2d} \quad (2.28)$$

Sendo:

$f_{rc,i}$ - Frequência de ressonância de cavidade (Hz);

c - Celeridade (m);

d - Distância entre os dois elementos (m);

n - Números inteiros sucessivos (1, 2, 3, ...).

Estes fenômenos podem acontecer também em salas onde existem superfícies paralelas entre si. Neste caso, para baixas frequências, devido à distância entre as superfícies paralelas (d) ser muito superior em relação aos elementos duplos de isolamento sonoro. Esta onda caracteriza-se por uma distribuição espacial estacionária dos valores de pressão sonora e velocidade das ondas ao longo do campo sonoro, originando zonas de pressão sonora mínima, denominadas “nodes”, e zonas de pressão sonora máxima, denominadas de “antinodes” (Fig. 2.20) [19].

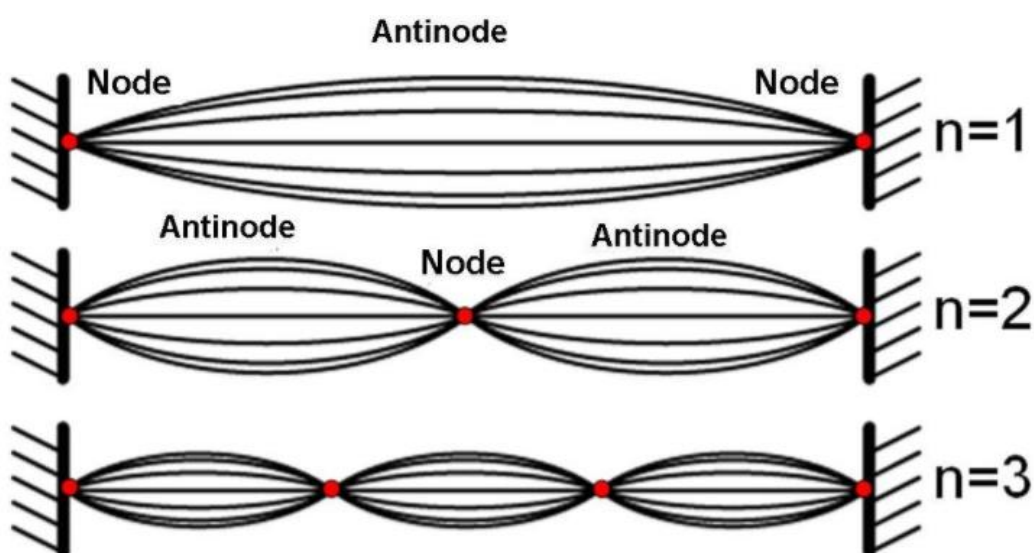


Figura 2.20 - Representação de ondas estacionárias entre duas superfícies paralelas [26]

Para frequências de incidência inferiores à frequência de ressonância de conjunto, ($f < f_0$), o conjunto comporta-se como um elemento simples e aumento da redução sonora é de 6 dB por oitava. Para frequências entre a frequência de ressonância do conjunto e a primeira frequência de ressonância de cavidade ($f_0 < f < f_{rc,1}$), a redução sonora aumenta 18 dB por oitava. Finalmente, para frequências superiores à primeira frequência de ressonância de cavidade ($f > f_{rc,1}$), a redução sonora do conjunto aumenta cerca de 12 dB por oitava, no entanto com reduções consideráveis do isolamento para as frequências iguais às frequências de ressonância de cavidade (Fig. 2.21) [14].

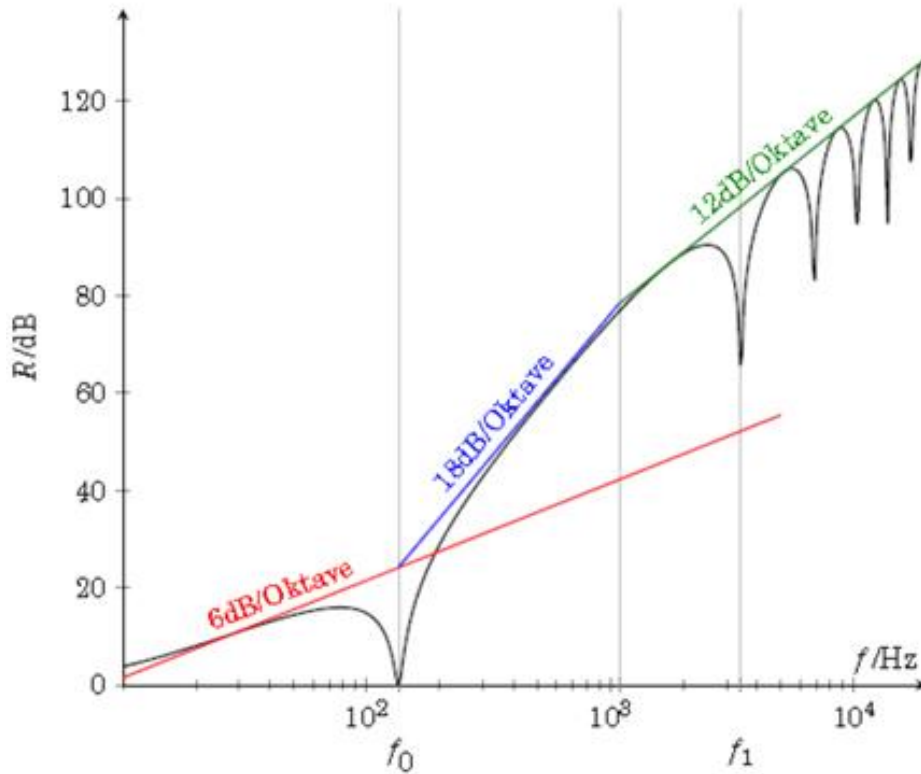


Figura 2.21 - Dependência da redução sonora com a frequência de incidência, para campo difuso, de duas placas de alumínio de 1 mm de espessura cada, com uma distância de 5cm [17]

2.4.1.4 Elementos Heterogéneos

Na presença de um elemento construtivo heterogéneo (ex. porta de madeira com envidraçado) é importante a determinação de uma redução sonora média (R_m) para todo o elemento, de forma a contabilizar todas as transmissões de som através dos vários subelementos com reduções sonoras distintas. A expressão 2.29 apresenta uma média energética ponderada pela área de cada um dos subelementos diferentes que constituem o elemento heterogéneo, ou seja, este processo equivale a considerar um elemento construtivo com uma transmissão sonora equivalente às diferentes transmissões sonoras dos subelementos constituintes do elemento real [14].

$$R_m = 10 \log \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\tau_i S_i}{S_{total}}} \right) \quad (2.29)$$

Sendo:

R_m - Redução sonora média (dB);

$\tau_m = \frac{\tau_i S_i}{S_{total}}$ - Coeficiente de transmissão sonora médio;

τ_i - Coeficiente de transmissão sonora do subelemento construtivo i ;

S_i - área superficial do subelemento construtivo i (m²);

S_{total} - área superficial total do elemento heterogéneo (m^2).

2.5. Tempo de Reverberação

2.5.1 Definição

Uma fonte sonora localizada num espaço fechado origina ondas sonoras de origem *direta*, que por sua vez são refletidas sucessivamente pelas paredes ou obstáculos do compartimento, estas designadas ondas sonoras de origem *refletida*, ou seja, a onda direta, é acompanhada de uma sequência de ondas refletidas. As ondas sonoras refletidas tornam-se cada vez mais fracas, devido às perdas de energia, consequentes das absorções consecutivas nas paredes e móveis do compartimento e do efeito da absorção do ar [14].

O *tempo de reverberação* (TR) pode ser definido como o intervalo de tempo, a partir do qual a fonte sonora é extinta, medido em segundos, em que o nível de pressão sonora decai 60 dB (Fig. 2.22) [14].

Contudo, na prática, muitas vezes não é possível obter um decaimento do nível de pressão sonora de 60 dB, pois o ruído de fundo, no espaço considerado, sobrepõe-se antes deste decaimento ser atingido. Desta forma, considera-se apenas um decaimento de 30 dB, ou em alguns casos 20 dB, e a partir do declive da reta obtido, extrapolar o decaimento de 60 dB, (Fig. 2.22), obtendo o tempo de reverberação extrapolado TR_{30} (decaimento de 30 dB), ou TR_{20} (decaimento de 20 dB) [14].

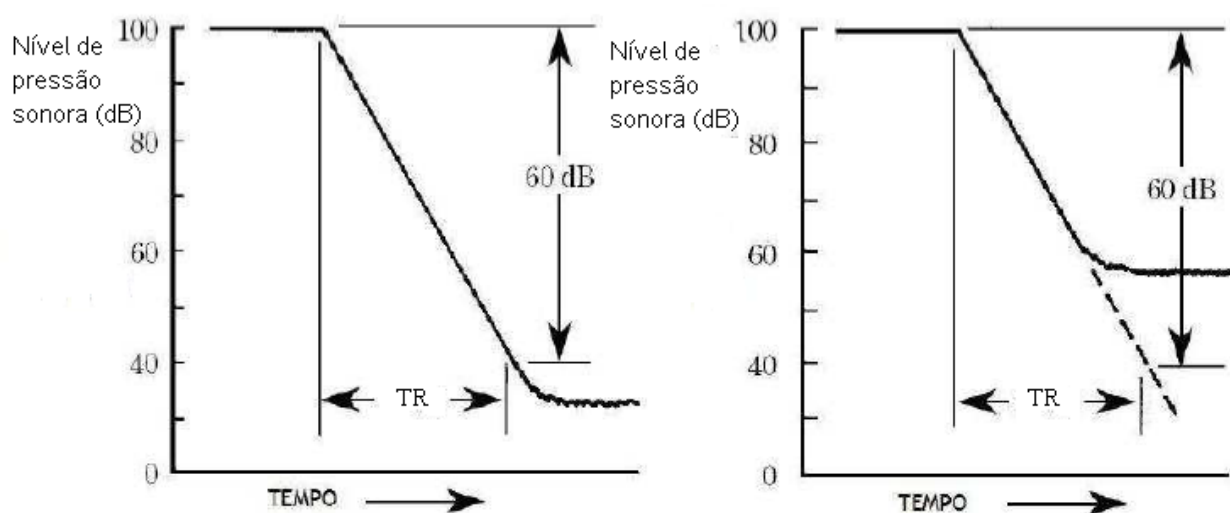


Figura 2.22 - Definição de Tempo de Reverberação TR , valor teórico (esquerda), valor obtido por extrapolação do declive do decaimento (direita) [adaptado de 14]

O tempo de reverberação depende de dois principais fatores: volume do compartimento e a sua área de absorção sonora. Para grandes salas com baixa área de absorção sonora (ex. ginásios) o tempo de reverberação é muito elevado (até 6 s), por outro lado para salas de volume reduzido e elevada área de absorção sonora baixa (ex. salas de receção) o tempo de reverberação é baixo (inferiores a 0,5 s).

As atividades desempenhadas no interior dos espaços são afetadas pelo tempo de reverberação do mesmo, como tal, atendendo à elevada gama de valores do tempo de reverberação, é comum utilizar-se valores ideais de tempo de reverberação em função do uso do espaço (Fig. 2.23) [14].

2.5.2 Fórmula de Sabine

Para estimativa do tempo de reverberação, dependendo das condições do campo sonoro, da forma geométrica do compartimento, etc., podem ser utilizadas várias fórmulas, como a fórmula de Sabine (1898), fórmula de Norris-Eyring (1930), fórmula de Millington-Sette (1932) e fórmula de Kuttruff (1970) [14].

Neste trabalho apenas será dado foco à Fórmula da Sabine, pois a norma EN ISO-10140 [4-7], referente às medições acústicas de elementos construtivos em laboratório, faz uso desta fórmula para calcular a absorção sonora equivalente a partir do tempo de reverberação.

O tempo de reverberação pode ser relacionado com o volume e a absorção sonora do compartimento em estudo através da *Fórmula de Sabine* (expressão 2.30). Na presença de campo sonoro difuso e coeficiente de absorção sonora média baixos, inferior a 0,20, esta expressão permite obter valores muito próximos da realidade [14].

$$TR = \frac{24 \cdot \ln(10) \cdot V}{c \cdot A} \approx \frac{0,16 \cdot V}{A} \quad (2.30)$$

Sendo:

TR - Tempo de reverberação (s);

V - Volume do compartimento (m^3);

A - Absorção sonora equivalente (m^2), $A = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i$;

α_i - Coeficiente de absorção sonora do material i ;

S_i - Área superficial do material i (m^2);

c - Celeridade (m/s).

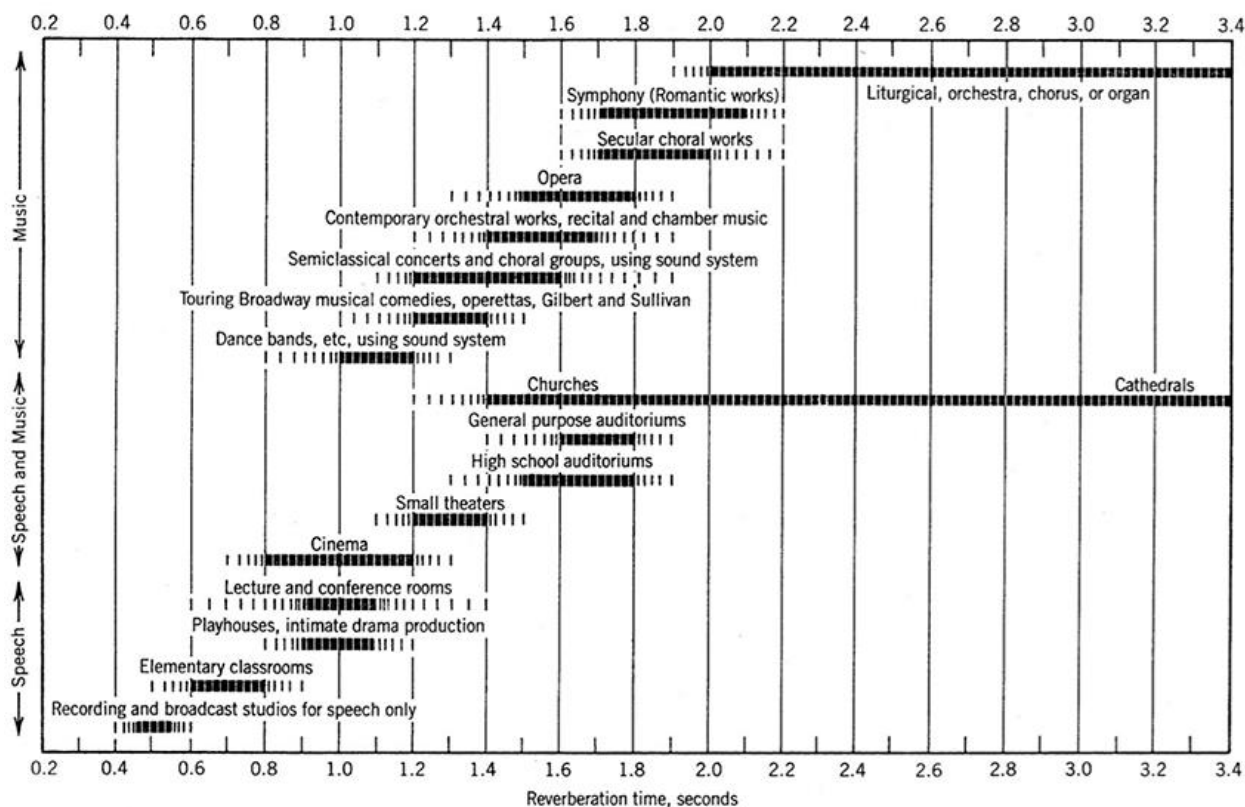


Figura 2.23 - Valores do tempo de reverberação ideal (s), em função do uso (500-1k Hz) [de Cavanaugh, 1999 consultado em 14]

3.

Isolamento Sonoro a Ruídos Aéreos de Portas

3.1. Estado da Arte

Neste subcapítulo procede-se a uma análise entre 151 diferentes portas acústicas oferecidas em catálogo por cinco fabricantes: *AMBICO*, *Krieger*, *Lidner Group*, *Overly-Door Company* e *Silêncio*. Os exemplos estudados são constituídos por uma gama de materiais: metal (aço e outros), madeira, plástico e vidro.

A redução sonora de um elemento construtivo (ex. porta), tal como descrito no subcapítulo 2.4, depende fundamentalmente da sua massa. Como tal, apresentam-se os valores da redução sonora de cada porta em função da sua massa por unidade de área (Fig. 3.1), retirados dos catálogos dos fabricantes acima mencionados [27-31].

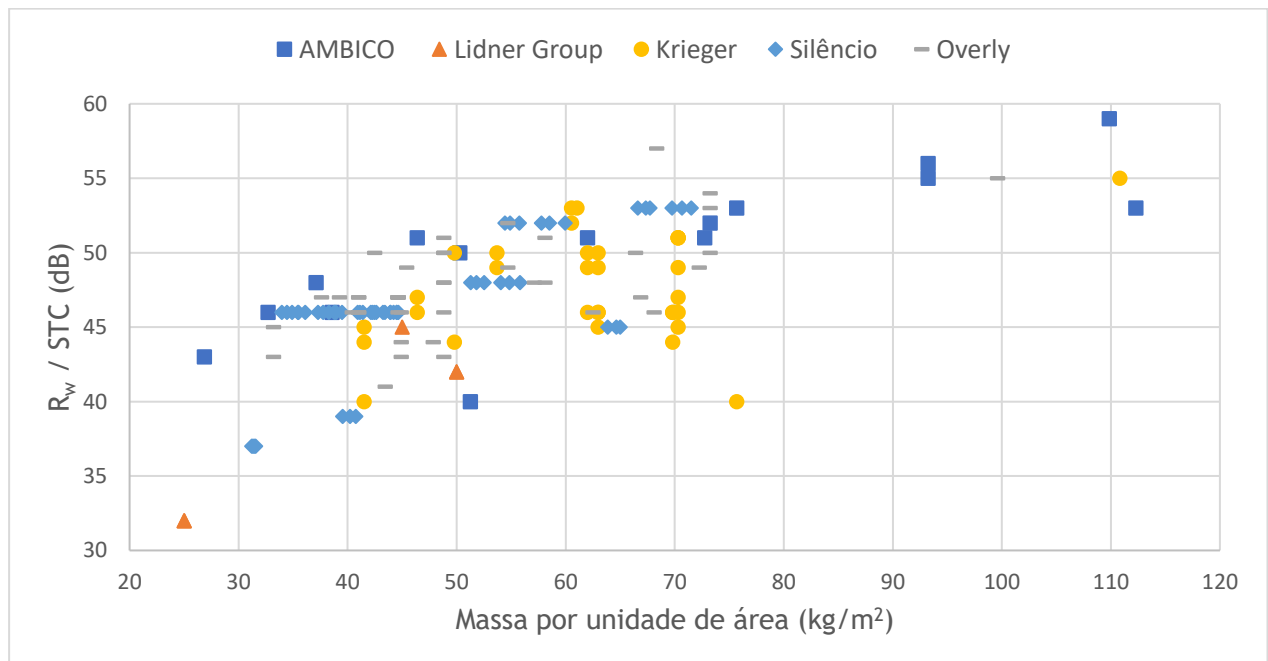


Figura 3.1 - Valores do índice de redução sonora R_w ou STC (dB) de portas de várias empresas, em função da massa por unidade de área (kg/m²) [27-31]

Os valores de redução sonora são apresentados pelos fabricantes americanos, nomeadamente pela *AMBICO*, *Krieger* e *Overly*, em *sound transmission class* (STC) calculado de acordo com a norma americana *ASTM E 90 - Standard Method for Laboratory Measurement of Airborne Sound Transmission* (Método Padrão para Determinação Laboratorial da Transmissão de Sons de Condução Aéreos)[32].

Os valores de STC são o equivalente aos valores de redução sonora ponderado R_w , ajustados pela curva de referência da norma europeia ISO 717-1 [33]. Apesar dos métodos de cálculo serem descritos em normas distintas, estes são muito semelhantes, como tal é possível equiparar os valores de STC e R_w [34].

Com o objetivo de analisar a dependência destas duas variáveis, ajustaram-se os dados a um modelo de aproximação logarítmica, dado ser a aproximação com melhor ajuste possível (Fig. 3.2). Com a equação da curva de aproximação (3.1) é possível fazer uma estimativa do valor de redução sonora de uma porta sabendo a sua massa por unidade de área.

Apesar do coeficiente de determinação R^2 ser muito baixo (0,48), ou seja, apenas 48% da variabilidade dos valores reais do isolamento sonoro são justificados pela aproximação logarítmica, optou-se por este modelo, pois este obteve o valor de R^2 mais elevado entre todos os outros modelos de aproximação testados.

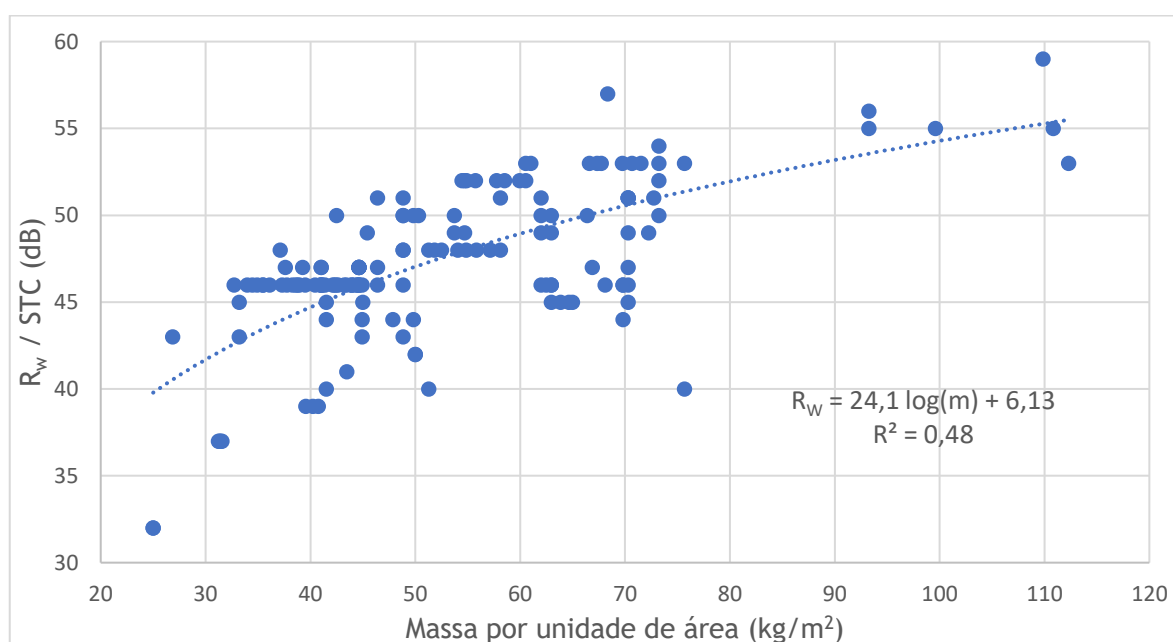


Figura 3.2 - Aproximação logarítmica dos valores dos índices de redução sonora (R_w ou STC, em dB) em função da massa por unidade de área (em kg/m²) de todos os exemplos considerados [27-31]

$$R_w \text{ ou } STC = 24,1 \times \log(m) + 6,13 \quad (3.1)$$

Sendo:

R_w ou STC - Índice de redução sonora ou *sound transmission class*, da porta (dB);

m - Massa por unidade de área, da porta (kg/m²).

O máximo valor de redução sonora, encontrado na bibliografia, é de 59 dB correspondendo a uma massa de aproximadamente 110 kg/m^2 (AMBICO, porta de aço com moldura de aço), o mínimo valor de redução sonora é de 32 dB para duas portas de massa 25 kg/m^2 (Lidner Group, porta totalmente envidraçada e porta de madeira) [27, 29].

O exemplo com melhor eficiência no isolamento sonoro é a porta de metal, com junta de compressão, da *Overly* com um índice de redução sonora de 57 dB com uma massa por unidade de área de aproximadamente 68 kg/m^2 , que comparada com o máximo valor do índice de redução sonora, acima mencionado (59 dB com 110 kg/m^2), a diferença de cerca de 40 kg/m^2 entre a massa das portas origina um acréscimo de apenas 2 dB na redução sonora. Este facto pode ser explicado por diversos fatores: materiais usados, estrutura da porta, tipo de vedantes, etc.

A porta da AMBICO, com o máximo de redução sonora (Fig. 3.3), é composta por dois painéis, painel principal ($\approx 44,5 \text{ mm}$) e painel acústico ($\approx 25,4 \text{ mm}$), material absorvente sonoro nos espaços vazios e três escovas de varrimento que funcionam também como sistema de colmatação da frincha inferior [27, 35].

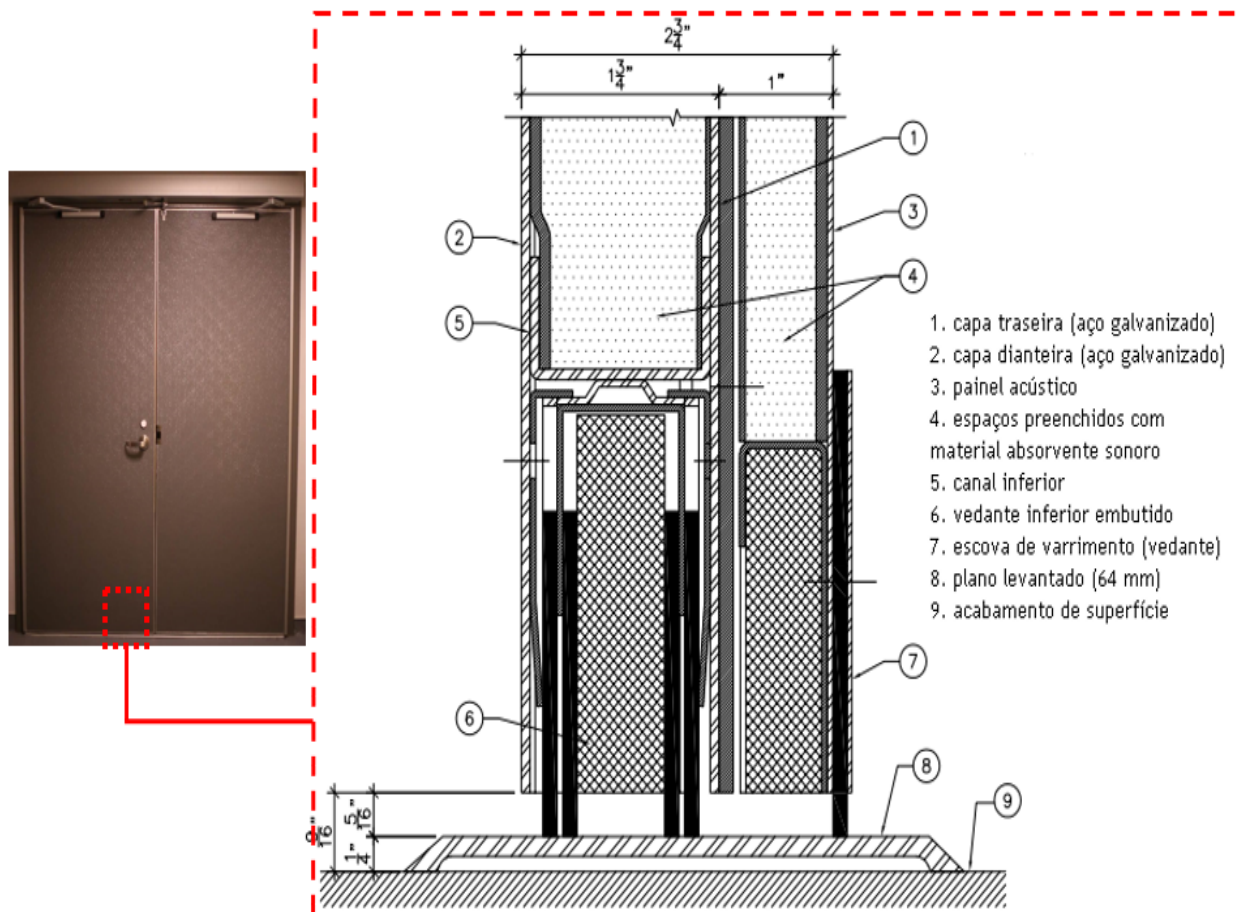


Figura 3.3 -Parte inferior da porta acústica de aço STC 57-59 da AMBICO [adaptado de 36]

A porta da *Overly*, acima mencionada, com um índice de redução sonora de 57 dB, é uma porta de metal *Tandem*, ou seja, é composta por uma moldura onde assentam duas portas metálicas com uma caixa de ar de 178 mm entre elas (Fig. 3.4). Construída com vedantes em todo o seu perímetro, nas laterais vedante *Single "H"* (vedante de compressão simples, de feltro ou

neoprene, juntamente com um retentor de metal) e na frincha inferior vedante *Super "H"* (Fig. 3.5)[28, 36, 37].

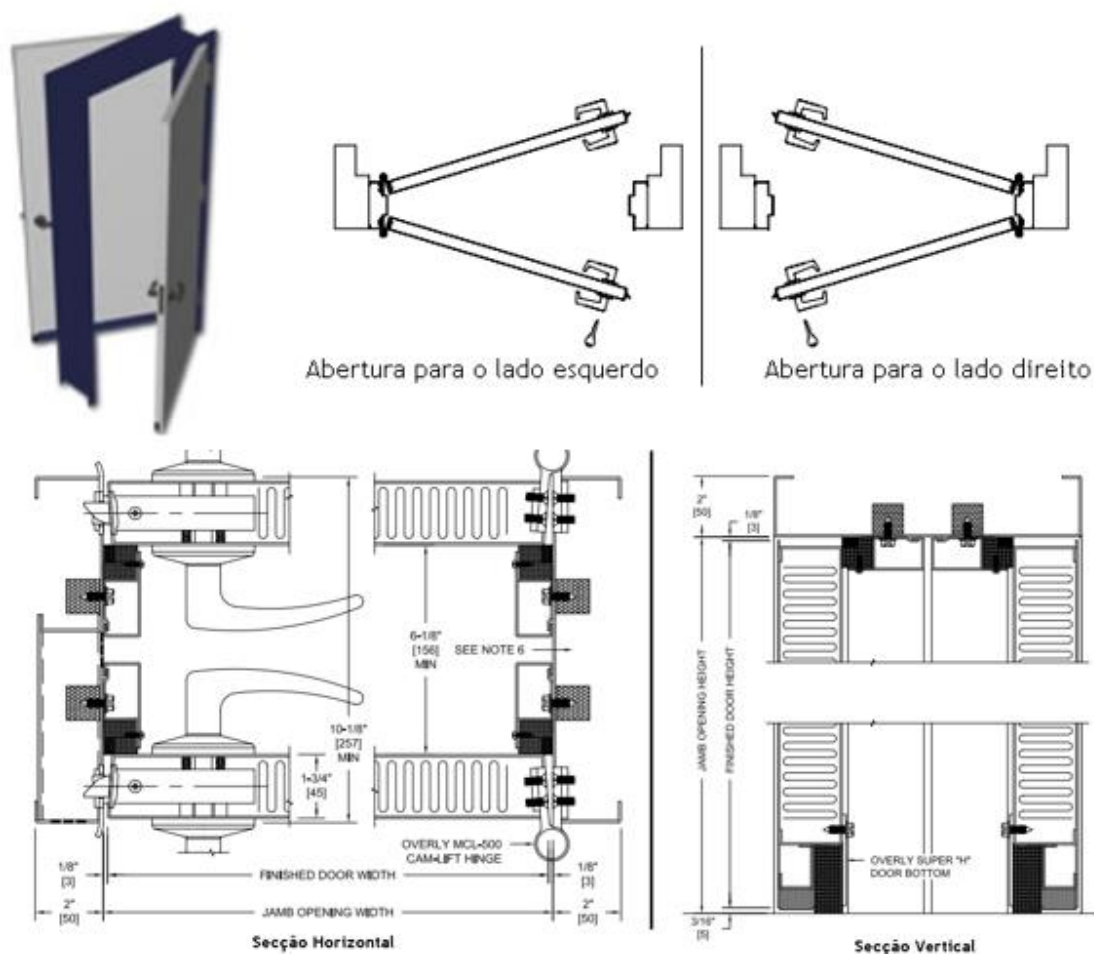


Figura 3.4 -Porta metálica *Tandem* da *Overly*, modelo 5792190 (em cima à esquerda); desenhos técnicos da mesma porta, vista de cima (em cima à direita), corte secção horizontal (em baixo à esquerda) e corte secção vertical (em baixo à direita). [adaptado de 37,38]

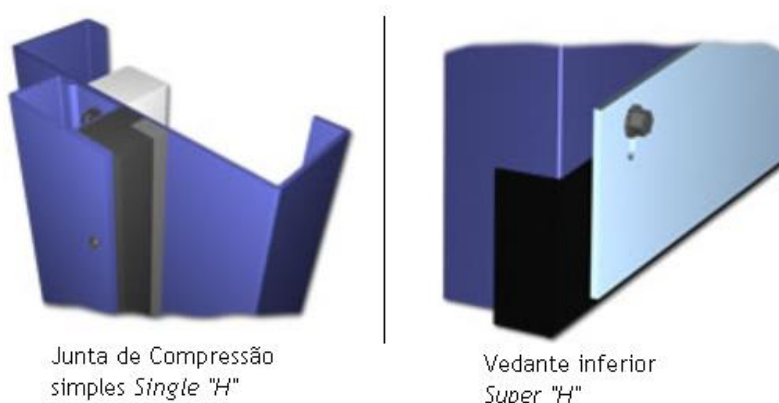


Figura 3.5 - Junta de compressão simples *Single "H"* aplicado nas laterais da porta metálica, modelo 5792190, da *Overly* (esquerda); Vedante *Super "H"* aplicado na borda inferior da mesma porta (direita) [adaptado de 38]

A pequena diferença entre os valores de redução sonora entre ambas as portas, apesar da diferença entre massas ser muito significativa, pode ser explicada por comparação entre as estruturas de cada porta. A porta da fabricante *AMBICO* tem uma elevada redução sonora, no entanto, devido à sua massa muito alta, pode não ser possível a sua aplicação em algumas situações. Por sua vez, a porta da *Overly*, além de possuir elementos de colmatação das frinchas em todo o seu perímetro, é uma porta dupla com uma caixa de ar no seu interior, comportando-se como um elemento duplo, que como demonstrado no subcapítulo 2.4.1.3 confere valores de redução sonora mais elevados sem um acréscimo significativo da sua massa.

De seguida, apresentam-se os tipos de materiais utilizados na construção das 151 portas analisadas (Fig. 3.6). Como primeira análise, pode-se verificar que o vidro é o material com menores valores de índice de redução sonora, tendo como máximo 44 dB. Utilizando a expressão 2.23 e uma celeridade das ondas longitudinais no vidro de 5200 m/s (quadro 2.5), pode-se explicar a baixa redução sonora deste material pelo facto da sua frequência crítica, para as espessuras mais comuns (4-6 mm), se situar numa gama de frequências muito sensíveis para o ouvido humano, entre 2000 e 3000 Hz [14]. Para que a frequência crítica se situasse numa frequência inferior a 100 Hz, desta forma sendo menos sensível para o ouvido humano, seria necessária uma espessura de vidro superior a 12 cm, o que torna a sua utilização em portas praticamente inviável [38]. A relação da frequência crítica do vidro com a sua espessura está apresentada na figura 3.7.

Os restantes materiais têm valores de índice de redução sonora muito heterogêneos, sendo preciso uma análise mais detalhada para se retirar qualquer conclusão.

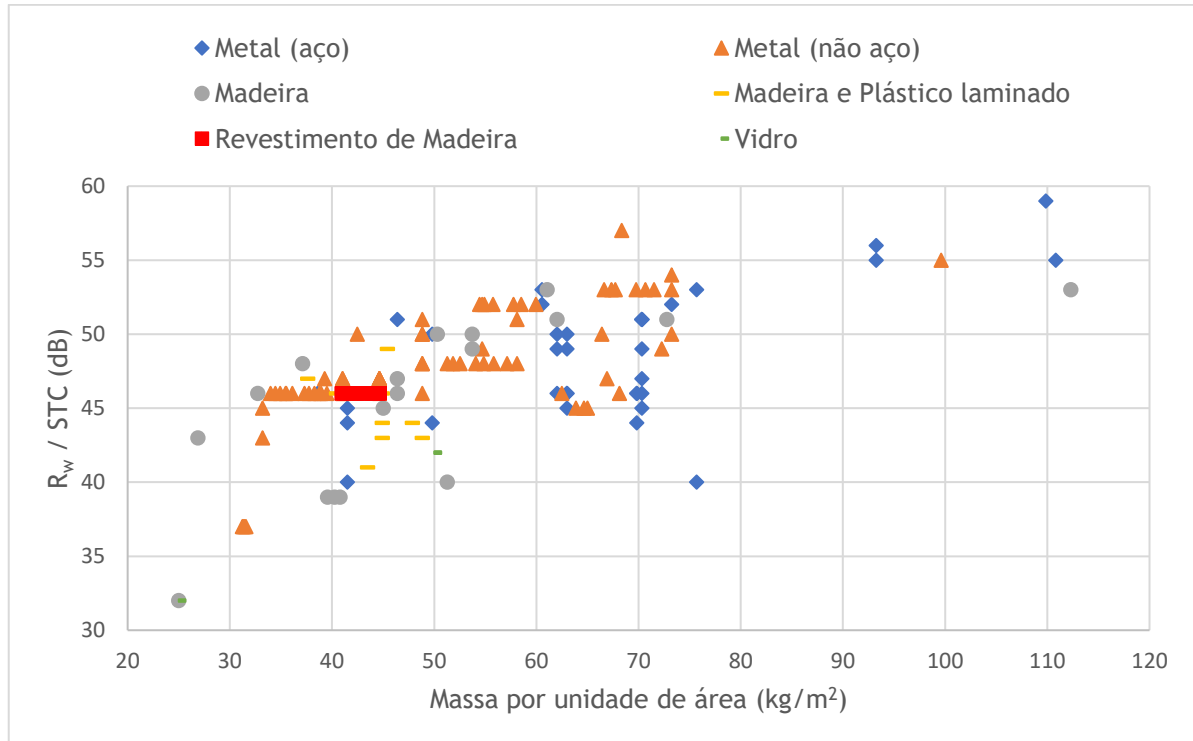


Figura 3.6 - Valores de índice de redução sonora, R_w ou STC (dB), para cada material, em função da massa por unidade de área (kg/m^2) [27-31]

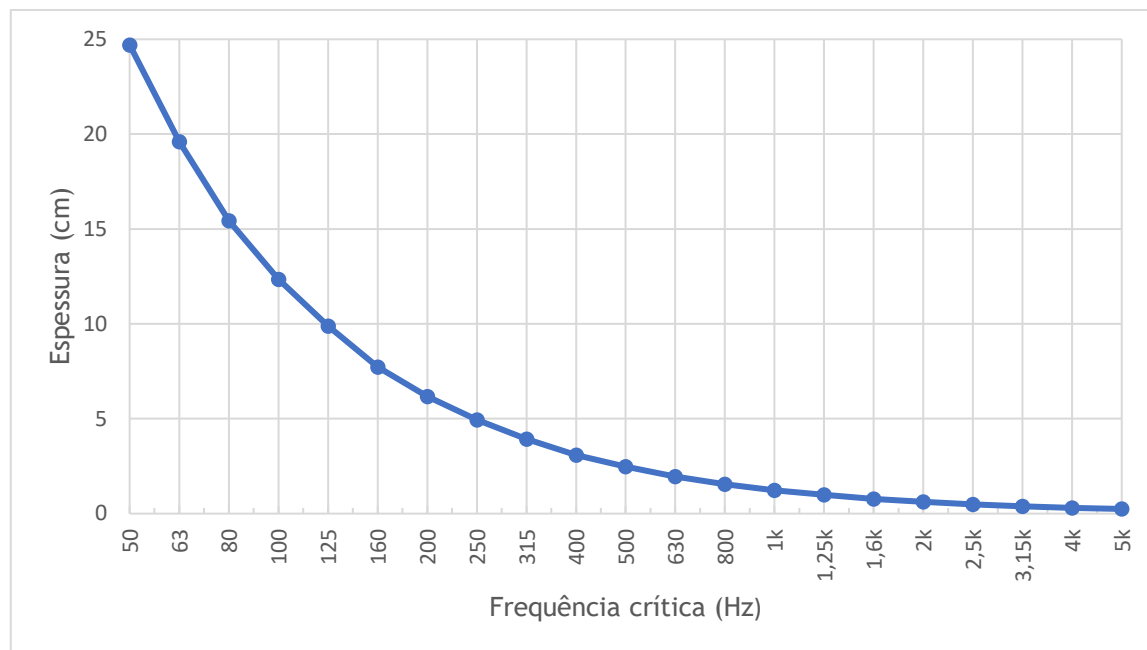


Figura 3.7 - Frequência crítica do vidro em função da espessura (cálculo pela expressão 2.23 e assumindo uma celeridade das ondas longitudinais de 5200 m/s [14])

Agora, comparando apenas as portas de madeira e as portas de metal (não aço), (Fig. 3.8), tal como acima apresentado (Fig. 3.2), optou-se por um modelo de aproximação logarítmica. As equações da curva de aproximação (3.2) e (3.3) permitem uma estimativa da redução sonora de uma porta de metal ou de madeira, sabendo a respetiva massa por unidade de área. Os valores do coeficiente de determinação R^2 destas aproximações são baixos (0,55 para a aproximação logarítmica das portas de metal (não aço) e 0,53 para a das portas de madeira), no entanto, tal como anteriormente (Fig. 3.2), dos modelos de aproximação testados, o de aproximação logarítmica foi o que obteve os valores de R^2 mais elevados.

$$\text{Para portas de metal (não aço): } R_w \text{ ou } STC = 25,0 \times \log(m) + 5,46 \quad (3.2)$$

$$\text{Para portas de madeira: } R_w \text{ ou } STC = 27,8 \times \log(m) - 0,75 \quad (3.3)$$

Sendo:

R_w ou STC - Redução sonora ou *sound transmission class* da porta (dB);

m - Massa por unidade de área da porta (kg/m^2).

Pelas curvas de aproximação logarítmica apresentadas na figura 3.8, verifica-se estas são quase paralelas, no entanto para valores mais elevados de massa as curvas aproximam-se uma da outra e vice-versa, ou seja, uma porta de metal de massa 100 kg/m^2 apresenta uma redução sonora ($\approx 56 \text{ dB}$) aproximada a uma porta de madeira com a mesma massa ($\approx 55 \text{ dB}$), enquanto que para portas de massa 20 kg/m^2 , a diferença entre as reduções sonoras é de aproximadamente 3 dB. Portanto, verifica-se que, apesar de pequena diferença, para a mesma massa, portas de metal apresentam geralmente uma redução sonora superior a portas de madeira. Isto pode ser explicado devido às diferentes propriedades físicas (frequências críticas, velocidade de propagação das ondas, tensões de cisalhamento, etc.) do metal e da madeira.

Na literatura existem alguns materiais, com menores coeficientes de transmissão e menor massa volúmica, que podem substituir a madeira para a construção de portas, tal como plásticos, MDF (*medium density fibreboard*), cartão, entre outros. Em 2016, Asdrubali *et al.* [39] propôs a utilização de placas de cartão, com várias configurações diferentes, como isolamento acústico, tendo obtido, na melhor situação, resultados de índice de redução sonora de 60 dB. Este material poderia então ser usado na construção sustentável de portas pois além das propriedades mecânicas e acústicas adequadas, tem um impacto ambiental reduzido quando comparado com outros materiais comumente usados, já que o cartão tem uma pegada ecológica reduzida quando fabricado a partir de materiais reciclados [39].

Em resumo, esta análise de diferentes exemplos de portas existentes no mercado é importante para se obter uma referência de valores do índice de redução sonora em função da massa superficial da porta. Desta forma é possível comparar as portas estudadas neste trabalho com as portas acústicas no mercado.

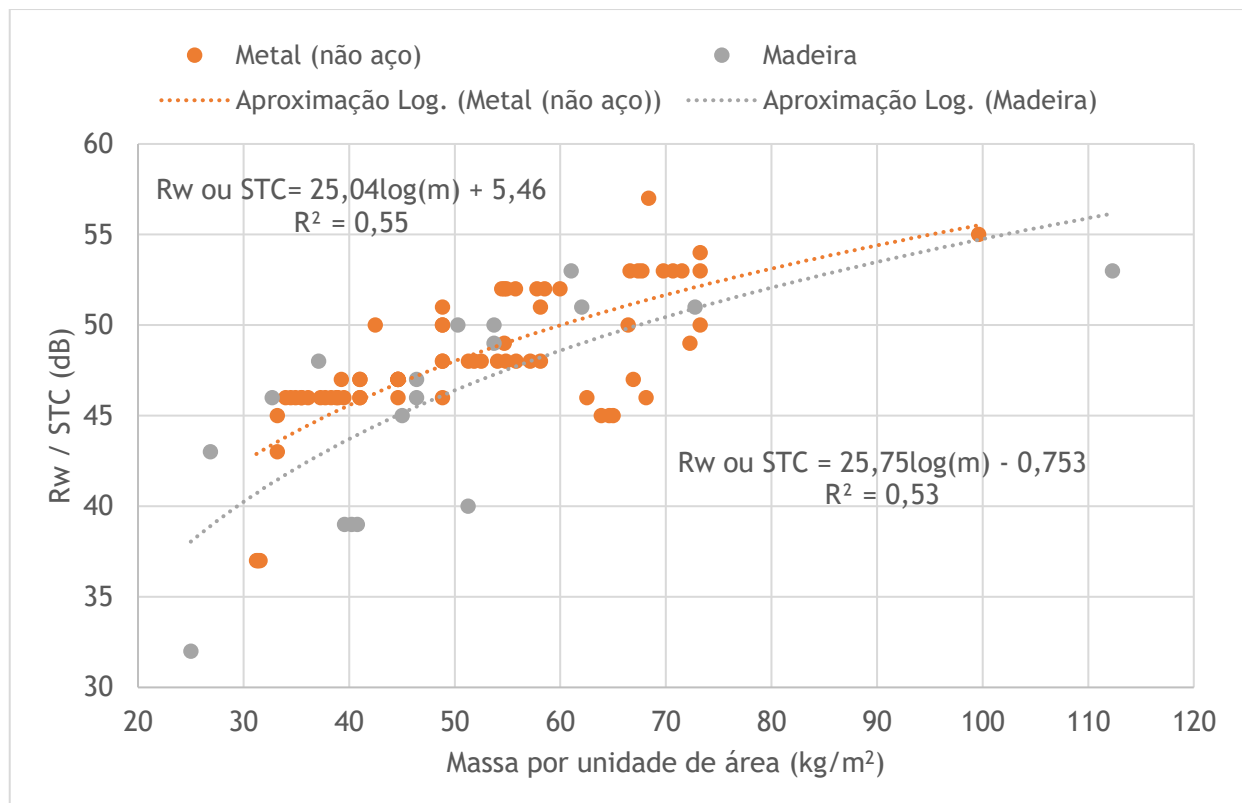


Figura 3.8 - Aproximação logarítmica dos valores de índice de redução sonora, R_w ou STC (dB), em função da massa por unidade de área (kg/m^2), das portas de madeira e de metal (não aço) [27-31]

3.2. Modelos de Previsão

Em 2012, Kurra [40] procedeu à comparação de três modelos de previsão da redução sonora: modelo *Sharp*, desenvolvido por Sharp, Cremer, Göesele, entre outros, para cálculo da redução sonora entre elementos simples ou duplos; modelo matricial *CTSB* desenvolvido por Munjal para o cálculo do coeficiente de transmissão (τ) entre elementos com múltiplas camadas, e modelo

baseado nas impedâncias, *Impedance Model*, desenvolvido por Au e Bryne, também para o cálculo do coeficiente de transmissão sonora de elementos multi-camada [40].

O modelo *Sharp* é o modelo mais simplificado dos três apresentados, como tal é o modelo apresentado na maioria dos livros técnicos de fundamentos de acústica. Este é aplicado para elementos simples ou duplos, com camadas idênticas ou distintas, e distingue os valores de redução sonora em função da frequência da onda sonora incidente, tal como o modelo apresentado no subcapítulo 2.4.1. Este modelo permite o cálculo do acréscimo na redução sonora quando se adicionam mais camadas, no entanto não permite determinar o isolamento sonoro de todos os tipos de elementos multi-camada usados em edifícios. O *software Insul* foi desenvolvido, a partir deste modelo, para o cálculo da redução sonora de forma mais simples e rápida [40].

O *CTSB Model*, baseia-se na estimativa das tensões compressivas e de cisalhamento de uma onda sonora plana (propaga-se numa só direção) incidente numa superfície sólida. As potências sonoras da onda incidente e transmitida são calculadas através de uma matriz de transferência energética pelo elemento sólido. O *Acousys SW* é o *software* criado, com base neste método, para calcular a redução sonora de elementos com múltiplas camadas [40].

O último método, *Impedance Model*, é baseado na variação da impedância de uma onda sonora ao atravessar um elemento sólido multicamada, as impedâncias em ambos os lados do elemento são combinadas nas interfaces entre as camadas (Fig. 3.9). Este método pode ser utilizado tanto em incidência direta da onda, como em campo sonoro difuso [40].

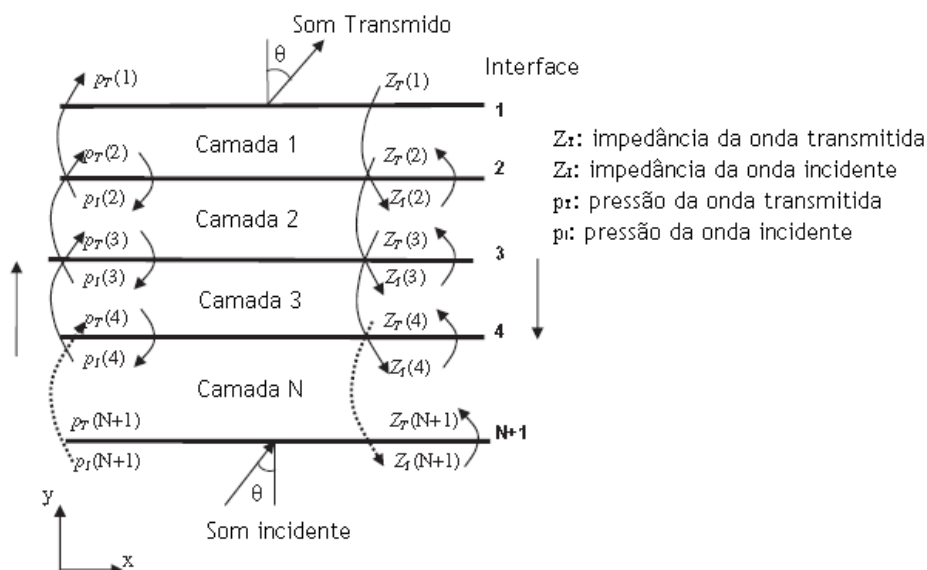


Figura 3.9 - Estrutura de cálculos do modelo de impedâncias (*Impedance Model*) [adaptado de 41]

Regra geral, as diferenças entre estes modelos de previsão são pequenas, no entanto os resultados obtidos pelos modelos e os resultados obtidos por medições são mais elevados para altas frequências, devido ao facto das frequências críticas e os modos de ressonância serem mais usuais nas altas frequências. Os modelos *CTBS* e *Impedance Model* são capazes de calcular a redução sonora para estruturas multicamada mais complexas, enquanto o modelo de *Sharp* é mais comumente aplicado a elementos de construção mais simples [40].

Em 2014, Neubauer *et al.* [41] utilizam a sensação de volume sonoro (*loudness*) para descrever o isolamento sonoro de qualquer elemento (por exemplo uma porta), visto esta ser uma unidade psicoacústica, que tem em conta os efeitos temporais e espectrais de mascaramento sonoro, relacionada com o ouvido humano, o principal afetado pela falta de isolamento sonoro entre espaços. Neste estudo, foi determinado e comparado o isolamento sonoro a ruídos aéreos a partir de dois métodos, o modelo convencional baseado nas diferenças entre níveis de pressão sonora, e um modelo com base no cálculo do nível ponderado de sensação de volume sonoro normalizado, $L_{nor,w}$, em fone. O princípio do método é baseado na transformação dos níveis de pressão sonora em níveis de sensação de volume sonoro (*loudness*), descrita na ISO 226 [41].

Os resultados mostram que, nos dois tipos de sinais em estudo (ruído rosa e excerto de uma música do artista *Eminem*), para valores de redução sonora ponderada R'_w pré-determinados, 20, 40 e 60 dB, a menor diferença entre os dois níveis é observada para médias frequências. No entanto, é de notar que, para altas frequências e valores de isolamento sonoro elevados ($R'_w = 60$ dB), esta diferença é mais acentuada, o mesmo acontece para baixas e médias frequências com valores de isolamento sonoro reduzidos (Fig. 3.10).

Em conclusão, esse estudo demonstra que o uso do nível de sensação de volume sonoro, em combinação com a ponderação introduzida pela força de flutuação específica do sinal (*fluctuation strength*), leva a uma medida mais detalhada do isolamento sonoro a ruídos aéreos no domínio da frequência [41]. Contudo, no presente trabalho este método não é aplicado, sendo que apenas se determinou o isolamento sonoro das portas a partir da redução sonora R e do índice de redução sonora R_w , dado que são estes os parâmetros descritos na série de normas EN ISO 10140 [4-7] e na norma NP EN ISO 717-1 [8].

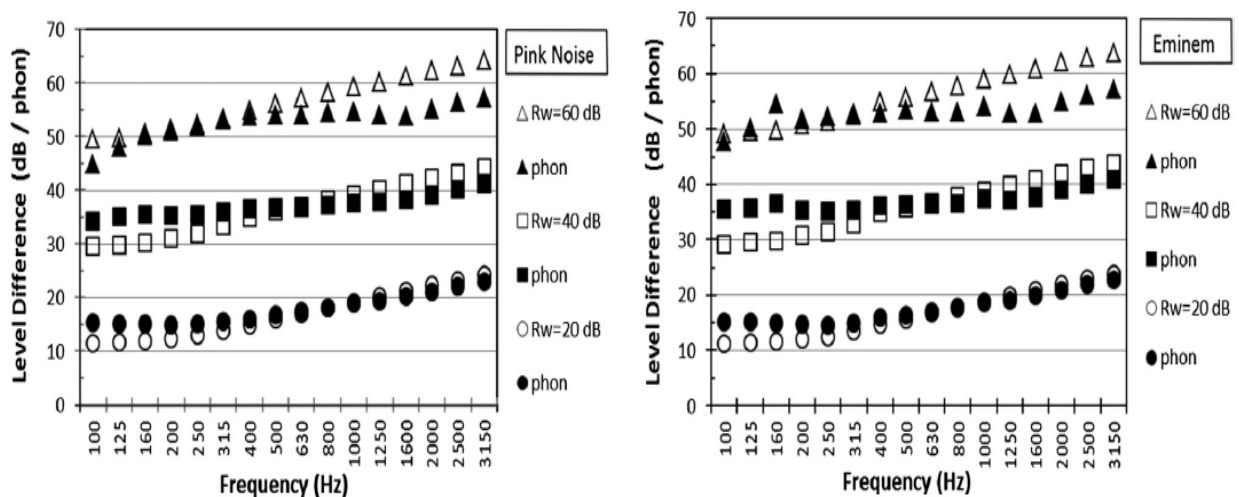


Figura 3.10 - Comparação entre a diferença de nível de pressão sonora ($L_1 - L_2 = \Delta R_w$) e a diferença de níveis de sensação de volume sonoro ($L_{N1} - L_{N2} \equiv \text{phon}$), em função da frequência, para os dois tipos de sinal em estudo, ruído de banda larga ruído rosa (esquerda) e ruído musical *Eminem* (direita) [41]

Os modelos anteriormente apresentados podem ser aplicados no cálculo da redução sonora de portas. Esta depende da transmissão sonora através da sua estrutura e através das frinchas existentes em todo o seu perímetro (Fig. 3.11), e pode ser calculado através da soma de ambos os coeficientes de transmissão ponderados à área total da porta (3.4) [42, 43].

$$\begin{aligned}
 R_{total} &= 10 \times \log \left(\frac{1}{\tau_{total}} \right) = 10 \times \log \left(\frac{1}{\tau_{estrutura} + \tau_{frinchas}} \right) \\
 &= 10 \times \log \left(\frac{S_{total}}{S_{estrutural} \times 10^{\frac{-R_{estrutura}}{10}} + S_{frinchas} \times 10^{\frac{-R_{frinchas}}{10}}} \right) \quad (3.4)
 \end{aligned}$$

Sendo:

R_i - Redução sonora de cada elemento i (= total, estrutura ou frinchas), para cada frequência (Hz);

τ_i - Coeficiente de transmissão sonora cada elemento i (= total, estrutura ou frinchas);

S_i - Área superficial cada elemento i (= total, estrutura ou frinchas) (m^2).

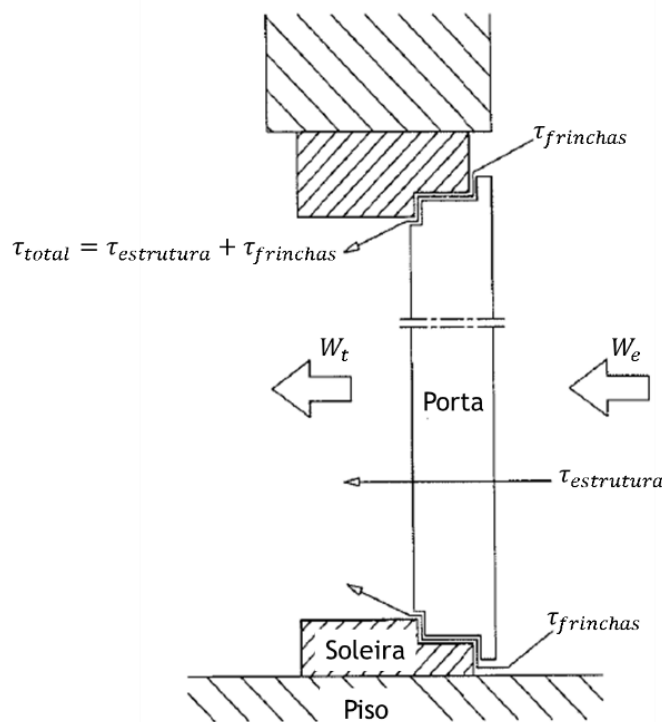


Figura 3.11 - Esquema da transmissão sonora através de uma porta (coeficientes de transmissão τ_{total} , $\tau_{estrutura}$ e $\tau_{frinchas}$; potências sonoras incidente W_e e transmitida W_t) [adaptado de 43]

Em 2000, Hongisto [42] utiliza e compara os modelos de Sharp e de Cummings e Mulholland para estimar o índice de redução sonora de portas de painel duplo e, respetivamente, com e sem material absorvente na cavidade. Este conclui que os modelos são uma boa aproximação à realidade, especialmente para frequências abaixo das frequências críticas de cada painel individual. Sendo que, quase como regra em todos os modelos acústicos, existe uma superestimativa dos valores de redução para as altas frequências [42].

No mesmo ano, Hongisto *et al.* [43] apresentam uma comparação do isolamento sonoro de vários tipos de estruturas internas de portas (madeira ou aço) mais comumente usadas:

- painel fino único (*single panel*);
- painéis finos separados (sem fixadores entre eles), com ou sem material absorvente sonoro na cavidade interior;

- painéis finos fixos (com fixadores rígidos entre eles), com ou sem material absorvente sonoro na cavidade interior;
- painéis juntos (sem cavidade entre eles);
- vários painéis em *sandwich* (painéis fixados entre um material central adesivo, como lâ de rocha com adesivo em ambas as faces).

Pelos resultados deste estudo conclui-se que as portas compostas por dois painéis finos separados, com material absorvente sonoro na cavidade obtiveram os valores de isolamento sonoro mais elevados, tendo obtido valores de índice de redução sonora R_w entre 8 a 10 dB superiores ao das portas com a mesma massa, mas com dois painéis fixos entre si. Por outro lado, a estrutura de porta com um painel fino único obtiveram os valores mais baixos de isolamento sonoro [43].

A estrutura de porta com os painéis em *sandwich* é muito utilizada na indústria, devido à facilidade de construção e obtenção de uma boa rigidez estrutural, no entanto os modelos de previsão do seu comportamento acústico existentes são muito complexos, sendo, portanto, necessário mais estudos com vista a melhorar e simplificar estes modelos. Portas com esta estrutura obtém valores de índice de redução sonora (R_w) entre 5 a 8 dB mais reduzidos do que portas, de igual massa, com estrutura de painéis finos fixos, com ou sem material absorvente sonoro na cavidade, pois a transmissão das vibrações internas da porta é mais fácil para estruturas de painéis em *sandwich*. Contudo este decréscimo no isolamento sonoro a ruídos de condução aérea pode facilmente ser corrigido se, numa das faces do material central, se optar por suprimir o adesivo, tornando assim esta estrutura semelhante à de painéis separados [43].

Segundo Hongisto [42] existem também modelos para estimar a influência das frinchas periféricas de uma porta, dos quais, os modelos de Gomperts e de Jones. O primeiro, utilizado para frinchas de forma regular, refere que a redução sonora de uma frincha é máxima imediatamente antes da frequência de ressonância da frincha, sendo que estas ocorrem sempre que o comprimento de onda corresponde a múltiplos inteiros de metade da profundidade da frincha. Para as portas mais comuns, esta frequência de ressonância ocorre acima dos 2000 Hz. O segundo, o modelo de Jones, é independente da frequência e pode ser utilizado para qualquer forma da frincha e assume que a transmissão sonora através da frincha é perfeita ($\tau_{frinchas} = 1$) para todas as frequências [42].

Melhorias no isolamento sonora da estrutura da porta não são eficientes caso haja elevada transmissão do som através das frinchas. Como por exemplo, se a diferença entre o índice de redução sonora (R_w) de uma porta com as frinchas periféricas completamente colmatadas e a mesma porta com as frinchas destapadas for superior a 3 dB, uma qualquer melhoria na estrutura da porta de N dB apenas advém uma melhoria no índice de redução sonora total da porta de $N/2$ dB [43].

Nas altas frequências, a transmissão sonora através das frinchas aparenta ter mais efeito no isolamento sonoro total de uma porta, ou seja, nas baixas frequências a transmissão sonora acontece principalmente através estrutura da porta e a transmissão pelas frinchas periféricas é quase desprezável, por outro lado, nas altas frequências a transmissão sonora através da estrutura é negligenciável e qualquer transmissão sonora através das frinchas reduz significativamente o índice de redução sonora total da porta [43].

Segundo o mesmo autor, as principais formas de aumentar o isolamento sonoro de uma porta são: aumentar a massa dos painéis constituintes; reduzir a quantidade de fixadores entre os painéis ou cobri-los com material flexível; reduzir a quantidade de adesivos entre as camadas da estrutura interna; e seleção e correta aplicação de materiais de colmatação das frinchas periféricas tais como fita isoladora, perfis adicionais ou materiais à base de borracha.

3.3. Legislação

3.3.1. Portuguesa

O documento que regula os requisitos acústicos em edifícios, com vista a melhorar as condições de conforto acústico nos espaços interiores é o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), inicialmente instituído pelo DL 129/2002 de 1 de maio e alterado pelo DL 96/2008 de 9 de junho, em vigor desde de 1 de julho de 2008 [44].

No presente estudo, será dado foco aos artigos onde estão descritos valores mínimos do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado, com o exterior (para fachadas, empenas e coberturas), $D_{2m,nT,w}$ (Quadro 3.1). Serão também apresentados os artigos onde os valores do Índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado, para paredes e lajes, $D_{nT,w}$, podem variar com a existência de porta nos elementos construtivos interiores (Quadro 3.2 e 3.3), nomeadamente os artigos 7º “Edifícios escolares e similares, e de investigação” e 8º “Edifícios hospitalares e similares” [44].

Quadro 3.1 - Valores limite mínimos do índice de isolamento sonoro a ruídos aéreos padronizado, com o exterior (para fachadas, empenas e coberturas), $D_{2m,nT,w}$, legislação portuguesa (RRAE 2008) [adaptado de 44]

Tipo de edifício	Zonas sensíveis	Zonas mistas (ou sensíveis com grande infraestrutura de transporte)
Habitacionais e mistos, e unidades hoteleiras	≥ 28 *#	≥ 33 *#
Escolares e similares, e de investigação	≥ 28 #	≥ 33 #
Hospitalares e similares	≥ 28 #	≥ 33 #
Comerciais e de serviços, e partes similares em edifícios industriais	≥ 25 #	≥ 30 #

* acrescidos de 3 dB quando o artº 12 n. 17 RGR (zonas urbanas consolidadas onde se excede os limites < 5 dBA)

se a área translúcida > 60% da fachada adiciona-se C ou C_{tr} ao valor medido

Como verificado nos quadros 3.2 e 3.3, os valores do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea entre locais do edifício são menos exigentes aquando a existência de porta de comunicação, com um decréscimo dos requisitos em 15 dB. Esta diminuição das exigências pode levar ao uso de portas com uma baixa redução sonora, originando tanto uma diminuição significativa do isolamento sonoro, como um aumento do desconforto acústico no interior dos espaços. Ora tratando-se de espaços de aprendizagem (salas de aula, bibliotecas, etc.), e de espaços hospitalares, o conforto acústico é de enorme importância para as atividades nestes desempenhadas.

Quadro 3.2 - Valores limite mínimos do índice de isolamento sonoro a ruídos aéreos, $D_{nT,w}$, entre locais do estabelecimento de ensino, segundo artigo 7º do RRAE 2008 [44]

Locais de emissão \ Locais de receção	Salas de aula (*), de professores, administrativas	Bibliotecas e gabinetes médicos	Salas polivalentes e berçários
Salas de aula, de professores, administrativas	≥ 45	≥ 45	≥ 45
Salas de aula musical, salas polivalentes, refeitórios, ginásios e oficinas	≥ 55	≥ 58	≥ 50
Berçários	≥ 53	≥ 55	≥ 48
Corredores de grande circulação (**)	≥ 30	≥ 35	≥ 30

(*) incluindo salas de aula de música

(**) considerando que haverá porta de comunicação com os locais recetores; se tal não for o caso, os valores indicados serão acrescidos de 15 dB.

Quadro 3.3 - Valores limite mínimos do índice de isolamento sonoro a ruídos aéreos, $D_{nT,w}$, entre locais do edifício, segundo artigo 8º do RRAE 2008 [44]

Locais de emissão \ Locais de receção	Blocos operatórios, gabinetes médicos, salas de consulta ou exame	Enfermarias, salas de tratamento, administrativas e de convívio
Blocos operatórios, gabinetes médicos, salas de consulta ou exame	≥ 48	≥ 40
Enfermarias, salas de tratamento	≥ 55	≥ 45
Salas administrativas e de convívio	≥ 55	≥ 48
Circulações internas (*)	≥ 35	≥ 30
Refeitórios e cozinhas	≥ 52	≥ 45
Oficinas	≥ 55	≥ 48

(*) considerando que haverá porta de comunicação com os locais recetores; se tal não for o caso, os valores indicados serão acrescidos de 15 dB.

Como tal, esta diminuição das exigências dos valores mínimos do isolamento sonoro não se justifica, devendo-se utilizar portas valores de redução sonora suficientes para manter o índice de isolamento sonoro próximo do valor estipulado no caso de não haver porta de comunicação, ou seja, cerca de 15 dB acima do estipulado com porta.

3.3.2. Outros Países

3.3.2.1 Áustria

Na Áustria, atualmente o documento que regula os requisitos acústicos de edifícios é a *ÖNORM B8115-4: Schallschutz und Raumakustik im Hochbau* (Insonorização e Acústica de Sala em Construção de Edifícios) de 9 de janeiro de 2003 [45], que complementa a *ÖNORM B8115-2* [46]. Este documento contém, além dos valores mínimos do isolamento sonoro para os elementos construtivos, instruções e exemplos de seleção de componentes e combinações de componentes que cumprem os limites propostos. Se outros componentes ou combinações forem usados, estes devem ser demonstrados por medições [47].

Os valores mínimos de índice de redução sonora para componentes exteriores estão apresentados no quadro 3.4.

Segundo o documento, para paredes exteriores, na existência de portas ou janelas, o índice de redução sonora (R_w) da janela ou porta exterior, não deve ser inferior a 5 dB do limite estipulado no quadro 3.3 [47].

Entre espaços interiores dos edifícios, a *ÖNORM B8115-4* utiliza o índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado ($D_{nT,w}$) os valores mínimos estão apresentados no quadro 3.5. Mais uma vez, este documento faz distinção dos valores do isolamento sonoro entre espaços com existência de janelas ou porta. Neste caso, apesar de os valores de isolamento sonoro serem menos exigentes caso haja porta ou janela de comunicação, estes variam consoante o local onde se encontram, por exemplo entre quartos (ou zonas de descanso) e zonas comuns do mesmo edifício a diferença de isolamento, com ou sem elemento de comunicação, é de 5 dB, já entre zonas comerciais ou escritórios e escadarias os valores limite de isolamento sonoro são menos rigorosos, havendo um decréscimo de 15 dB se existirem elementos de comunicação [47].

Quadro 3.4 - Valores mínimos de índice de redução sonora para componentes exteriores, para diferentes tipos de edifícios, legislação Austríaca [adaptado de 48]

Edifício	Elemento construtivo		Índice de redução sonora mínima (R'_w ou $R'_{res,w}$) (em dB), para um nível sonoro contínuo equivalente, $L_{A,eq}$ (em dB), no exterior do edifício					
			Dia					
			≤ 50	51 – 55	56 – 60	61 – 65	66 – 70	71 – 75
			Noite					
			≤ 40	41 – 45	46 – 50	51 – 55	56 – 60	61 – 65
Hospitais, centros de tratamento e similares	Paredes com o exterior, exceto paredes entre fogos ^(a)	$R'_{res,w}$ ^(b)	33	38	43	48	52	-
	Paredes entre fogos	R'_w ^(c)	52	52	52	52	52	-
	Tetos e paredes contra sótão	R'_w	47	47	47	52	52	-
Residências, Hotéis, Escolas, Jardins de infância e similares	Paredes com o exterior, exceto paredes entre fogos ^(a)	$R'_{res,w}$	33	38	38	43	43	48
	Paredes entre fogos	R'_w	52	52	52	52	52	52
	Tetos e paredes contra sótão	R'_w	42	42	42	47	47	47
Escritórios e Edifícios administrativos	Paredes com o exterior, exceto paredes entre fogos ^(a)	$R'_{res,w}$	33	33	33	33	38	43
	Paredes entre fogos	R'_w	52	52	52	52	52	52
	Tetos e paredes contra sótão	R'_w	42	42	42	42	42	42

^(a) sem existência de janela ou porta exterior;

^(b) redução sonora aparente resultante, para elementos entre o edifício e o exterior;

^(c) redução sonora aparente, para elementos entre fogos.

Quadro 3.5 - Valores mínimos do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea, entre componentes interiores de edifícios, legislação Austríaca [adaptado de 48]

Localização do elemento separador	Índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado mínimo, $D_{nT,w}$ (em dB), entre espaços do edifício	
	sem	com
	Conexão através de janela, porta ou similares	
Entre prédios adjacentes	60	-
Entre zonas comuns do edifício (salas de convívio, escadaria, caves, lavandarias, etc.)	55	35
Entre zonas de apartamentos adjacentes	50	-
Entre apartamento e zonas comuns do edifício (salas de convívio, caves, lavandarias, etc.)	50	35
Entre espaços comerciais ou escritórios e escadarias	50	35
Entre apartamentos e garagens, incluindo entradas e saídas de veículos	60	-
Entre espaços comerciais ou escritórios e garagens, incluindo entradas e saídas de veículos	55	38
Entre quartos (ou zonas de descanso) e zonas comuns	55	50
Entre quartos de hotel, de tratamento ou de hospital ou espaços interiores do apartamento	55	38
Entre quartos de hotel, de tratamento ou de hospital ou espaços interiores do apartamento e escadarias		

3.3.2.2 França

A legislação de 25 de abril de 2003 emitida, em França, pelo Ministério do Ambiente e do Desenvolvimento Sustentável (*Ministère de l'Écologie et du Développement Durable*), regula os limites do ruído em estabelecimentos de ensino e saúde, edifícios residenciais e hotéis, e edifícios não residenciais [48].

Como o foco deste trabalho é o isolamento de portas, serão apenas apresentados os valores de isolamento sonoro que dependem, ou são afetados pela existência de porta de comunicação entre divisões, nomeadamente, para estabelecimentos de ensino e de saúde.

Em relação a estabelecimentos de ensino (Quadro 3.6) verifica-se que existe uma diminuição dos requisitos mínimos do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado ($D_{nT,A} = D_{nT,w} + C$, de acordo com a norma EN ISO 717-1 [33], sendo C o termo de adaptação espectral, com o filtro A, para ruído rosa), por exemplo entre salas de aula, passando de 43 dB sem porta de comunicação para 40 dB com porta de comunicação [48].

Os valores mínimos do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado ($D_{nT,A}$), relativamente aos estabelecimentos de saúde, estão apresentados no quadro 3.7. As portas entre os vestiários e os gabinetes de consulta ou salas de cirurgia deverão ter um valor de índice de redução sonora R_w igual ou superior a 35 dB [48].

Quadro 3.6 - Valores mínimos do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado ($D_{nT,A}$) para estabelecimentos de ensino, legislação Francesa [adaptado de 49]

Locais de Emissão Locais de Recepção	Salas de aula, locais de atividades práticas e de administração	Salas médicas, enfermaria, oficinas de pouco ruído, cozinha, locais fechados de montagem, salas de reunião, sanitários	Escadarias	Circulações, Vestiários fechados	Salas de música, salas polivalentes, pavilhões de desporto	Salas de restauração	Oficinas ruidosas
Salas de aula, locais de atividades práticas e de administração, bibliotecas, salas de música, salas de reunião, salas de professores, oficinas de pouco ruído	≥ 43 ^(a)	≥ 50	≥ 43	≥ 30	≥ 53	≥ 53	≥ 55
Salas médicas, enfermaria	≥ 43 ^(a)	≥ 50	≥ 43	≥ 40	≥ 53	≥ 53	≥ 55
Salas polivalente	≥ 40	≥ 50	≥ 43	≥ 30	≥ 50	≥ 50	≥ 50
Salas de restauração	≥ 40	≥ 50 ^(b)	≥ 43	≥ 30	≥ 50	-	≥ 55

^(a) um valor de 40 dB é admitido no caso de existência de uma ou mais portas de comunicação;

^(b) com exceção de comunicação entre cozinha e sala de restauração.

Quadro 3.7 - Valores índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado ($D_{nT,A}$) para estabelecimentos de saúde, legislação Francesa [adaptado de 49]

Locais de Emissão Locais de Recepção	Alojamento e cuidados	Salas de exames e consultas, escritórios médicos e enfermagem, salas de espera	Salas de operação, de obstetrícia e salas de trabalho	Circulação interna	Outros locais
Salas de operação, de obstetrícia e salas de trabalho	≥ 47	≥ 47	≥ 47	≥ 32	≥ 47
Alojamento e cuidados, Salas de exames e consultas, escritórios médicos e enfermagem, salas de espera (*), outros locais onde podem estar presentes doentes	≥ 42	≥ 42	≥ 47	≥ 27	≥ 42

(*) exceto salas de espera de serviços de urgência

3.3.2.3 Holanda

Na Holanda, os requisitos acústicos para edifícios escolares estão legislados na norma *NBN S 01-400-2:2012 Akoestische criteria voor schoolgebouwen* (Critérios acústicos para edifícios escolares)[49], publicada em 2012, em vigor a 1 de janeiro de 2013. Esta apresenta, além de

outros parâmetros acústicos, os valores mínimos do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado, ($D_{nT,A} = D_{nT,W} + C$), para edifícios com atividades de ensino (quadro 3.8) [49].

Tal como nos subcapítulos 3.3.2.1 e 3.3.2.2, ocorre uma diminuição das exigências no valor do isolamento sonoro ($D_{nT,A}$) quando existe porta de comunicação, havendo um decréscimo de 4 dB no isolamento sonoro entre salas de aula e entre jardins de infância. [50] O mesmo documento propõe que, para casos onde se preveja uma maior exigência no isolamento, um acréscimo de 4 dB aos valores apresentados no quadro 3.8. Por outro lado, este introduz uma tolerância de 2 dB, devido a possíveis erros de medição [50].

Quadro 3.8 - Valores mínimos do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado ($D_{nT,A}$) para edifícios escolares, legislação Holandesa [adaptado de 50]

Local de Emissão \ Local de receção	Sala de aula	Jardim de infância	Sala de música	Sala de estudo /investigação	Zona de recreio interior	Ginásio, pavilhão desportivo, oficina	Sala de professores	Sanitários	Corredores (pouca afluência)	Corredores (uso contínuo)	Sala de convívio
Sala de aula	44 ⁽⁶⁾	48	56 ⁽³⁾	(1)	56	56	48	48	32	36	44 ⁽⁵⁾
Jardim de infância	(1)	44 ⁽⁶⁾	52 ⁽³⁾	(1)	32	52	44	44	32	36	44 ⁽⁵⁾
Sala de música	(1)	(1)	52 ⁽³⁾	(1)	56	56	(1)	48	32	36 ⁽³⁾	44 ⁽⁵⁾
Sala de estudo /investigação	48	52	60 ⁽³⁾	40	60	60	52	52	32	36	44 ⁽⁵⁾
Ginásio, pavilhão desportivo, zona de recreio interior ⁽²⁾ , oficina	(1)	(1)	(1)	(1)	32	32	(1)	32	s.v.	s.v.	s.v.
Sala de professores	(1)	44	52 ⁽³⁾	(1)	52	52	44	44	(1)	(1)	(1)
Sanitários	(1)	(1)	(1)	(1)	32	32	(1)	32	s.v.	s.v.	s.v.
Corredores, sala de convívio	(1)	(1)	(1)	(1)	s.v.	s.v.	38 ⁽⁴⁾	s.v.	s.v.	s.v.	s.v.

⁽¹⁾ valor definido na norma *NBN S 01-400-2:2008*;

⁽²⁾ zona de recreio interior é considerado circulação (pouca afluência) se nunca usados durante período de aulas;

⁽³⁾ para instrumentos muito ruidosos é necessário isolamento extra;

⁽⁴⁾ valor deve ser respeitado por questões de privacidade;

⁽⁵⁾ evitar porta entre ambos os locais, se necessária, esta requer estudo acústico aprofundado;

⁽⁶⁾ valor de 40 dB admitido, caso exista porta de comunicação ou janela;

s.v. - sem valor exigido pelo documento.

3.3.3. Comparação entre os países

Neste trabalho, além da legislação portuguesa, foram consideradas as legislações, relativas ao isolamento sonoro, da Áustria, França e Holanda. Pode-se verificar que os valores mínimos de

isolamento sonoro são menos exigentes na existência de elementos de comunicação entre os espaços, por exemplo portas ou janelas. No quadro 3.9 estão apresentadas as diferenças nos valores do isolamento sonoro com e sem a existência de elemento de comunicação (porta).

A França é o país com menor decréscimo das exigências no isolamento, com uma diminuição do índice de isolamento sonoro ($D_{nT,A}$), para estabelecimentos de ensino entre salas de aula, enfermarias ou salas médicas, de apenas 3 dB [48].

Por outro lado, a legislação austríaca apresenta o maior decréscimo das exigências, de 17 dB no caso de existência de elemento de comunicação, entre quartos de hotel, de tratamento ou de hospital ou espaços interiores do apartamento e escadarias e entre espaços comerciais ou escritórios e garagens, incluindo entradas e saídas de veículos, no entanto para outros espaços a legislação é mais exigente, por exemplo entre quartos (ou zonas de descanso) e zonas comuns a diferença no isolamento, com ou sem elemento de separação, é de apenas 5 dB [46].

Na legislação portuguesa, apesar de não ser aquela com maior decréscimo das exigências, para estabelecimentos de ensino ou de saúde, existe um elevado decréscimo dos valores mínimos de isolamento sonoro (15 dB) entre corredores de circulação com elemento de comunicação, permitindo a utilização de portas com baixa redução sonora, tendo os valores mais baixos do limite de isolamento sonoro (entre 20 e 25 dB). Isto pode ter consequências negativas nas atividades desempenhadas no interior dos espaços adjacentes aos corredores, tais como salas de aula ou salas de operação [44].

Em 2014, Cunha [16] verificou que um dos principais problemas no conforto acústico de uma sala de aula, nomeadamente a sala B024 da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, era a falta de redução sonora da porta de comunicação, que poderia ser facilmente melhorada (cerca de 5 dB) pela colmatação das frinchas existentes no seu perímetro [16].

Quadro 3.9 - Valores de diferença no isolamento, com ou sem elemento de comunicação, e valores limite com o elemento de comunicação, entre os países em estudo [44, 46, 48, 49]

País	Diferença nos limites mínimos	Valor limite com existência de elemento de comunicação	Localização
Portugal	15 dB ^(a)	20 - 25 dB	Entre corredores e circulação
Áustria	5 - 17 dB ^(a)	35 - 38	Dependendo do espaço interior
	≥ 5 dB ^{(c) (d)}	-	Portas de paredes exteriores, exceto entre fogos
França	3 dB ^(b)	40 dB	Entre salas de aula, enfermarias ou salas médicas
	-	35 dB ^(c)	Portas entre vestiários e gabinetes de consulta, em estabelecimentos de saúde
Holanda	4 dB ^(b)	40 dB	Entre salas de aula e jardins de infância

^(a) índice padronizado de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea, ajustado pela curva de referenciada norma ISO 717-1 ($D_{nT,w}$);

^(b) índice padronizado de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea, utilizando ruído rosa, ajustado pela curva de referenciada norma ISO 717-1 ($D_{nT,A} = D_{nT,w} + C$);

^(c) valor mínimo de índice de redução sonora, ajustado pela curva de referência da norma ISO 717-1 (R_w);

^(d) valor limite inferior relativamente aos valores mínimos estipulados na legislação Austríaca (quadro 3.3).

4.

Metodologia

4.1. Introdução

O presente trabalho, com o objetivo de estudar possíveis melhorias no isolamento sonoro de portas exteriores, teve o apoio da empresa *Augusto Moreira, Lda.*, sediada em Santo Tirso, através da sua marca de portas de segurança *TRANCAR®* [3]. A empresa, além do fornecimento dos materiais e equipamentos necessários para a montagem da porta de teste, foi a promotora inicial da ideia de testar algumas possíveis soluções de materiais e combinações para melhoramento do isolamento sonoro de uma porta exterior.

As medições do isolamento sonoro das diferentes amostras realizaram-se nas câmaras reverberantes do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia de Universidade do Porto, com o apoio do engenheiro António Eduardo B. da Costa, responsável técnico pelo mesmo laboratório.

Os testes, condições de amostragem e cálculos foram realizados segundo as normas europeias EN ISO 10140 (partes 1, 2, 4 e 5) [4-7] e a norma europeia traduzida NP EN 717-1 [8].

4.2. Metodologia

4.2.1. Instrumentação e Condições do Medição

4.2.1.1 Instrumentação

Os instrumentos utilizados nas medições do isolamento sonoro estão apresentados no quadro 4.1.

Em relação à produção do sinal sonoro, neste trabalho foram utilizadas duas fontes sonoras *JBL EON15 G2* (Fig. 4.1), posicionadas de forma a cumprir a os requisitos impostos pela norma ISO 10140-5 [6], a saber:

- 0,7 m de distância mínima entre cada fonte sonora e pelo menos uma das posições com um mínimo de 1,4 m de distância;
- 0,7 m de distância mínima entre a fonte sonora e os limites e centro acústico da câmara reverberante, negligenciando pequenas irregularidades dos limites do espaço;

- as posições das fontes sonoras não podem ser simétricas em relação aos eixos ou planos centrais da câmara da fonte sonora;
- as diferentes posições das fontes sonoras não podem ser localizadas no mesmo plano paralelo aos limites da câmara;
- as posições das fontes sonora devem ter 0,1 m de desfasamento mínimo em relação ao mesmo plano.

Quadro 4.1 - Instrumentação utilizada nas medições laboratoriais do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea

Equipamento	Marca	Modelo
Sistema de aquisição de dados	<i>Brüel & Kjaer</i>	<i>PULSE</i> Tipo 3560-D
Software de aquisição e tratamento de dados	<i>Brüel & Kjaer</i>	<i>PULSE</i> v.X
Microfones	<i>Brüel & Kjaer</i>	½’’ tipo 4190
Fonte Sonora	<i>JBL</i>	<i>EON15 G2</i>
Termo-higrómetro	<i>TESTO</i>	435-2
Calibrador	<i>Brüel & Kjaer</i>	Tipo 4226

Relativamente à captação do sinal sonoro, foram utilizados três microfones *Brüel & Kjaer*, modelo ½’’ tipo 4190 (Fig. 4.1), posicionados segundo os requisitos impostos pela norma ISO 10140-4 [4], dos quais:

- utilizar, no mínimo, cinco posições em cada câmara, distribuídas com o máximo de espaçamento entre elas;
- 0,7 m de distância entre cada posição do microfone, entre os limites das câmaras reverberantes e entre qualquer difusor;
- 1,0 m de distância entre cada posição de microfone entre o elemento de teste e entre cada fonte sonora;
- Para cada posição, o tempo de captação médio deve ser igual ou superior a 6 segundos, para cada as frequências dos 100 aos 400 Hz, e não inferior a 4 segundos para frequências superiores a 400 Hz.

O sistema de aquisição de dados utilizado, *Brüel & Kjaer PULSE Tipo 3560-D* (Fig. 4.2), é um sistema multi-formato que inclui até 10 saídas *front-ends*, com uma amostragem de mais de 300 canais de dados, em tempo real, composto por 7 módulos, mais de 65 entradas e/ou 10 geradores de canais de saída. Este sistema, em conjunto com o *software* de aquisição de dados do mesmo fabricante (modelo *PULSE* v.X), permitem várias aplicações, das quais: aquisição e tratamento de dados ao longo do tempo; medidas gerais de ruído e vibração; cálculos acústicos básicos e avançados; análises estruturais; diagnósticos, e testes eletroacústicos [51].



Figura 4.1 - Fontes sonoras JBL EON15 G2 (esquerda), Microfones Brüel & Kjær ½'' - 4190 (direita) [Fotos do autor]



Figura 4.2 - Sistema de aquisição de dados Brüel & Kjær PULSE Tipo 3560-D [Foto do autor (esquerda), [51] (direita)]

O termo-higrómetro do fabricante *TESTO*, modelo 435-2, é um instrumento de medição multifunção pelo qual, através da sonda *QAI*, é possível medir a temperatura ambiente e de superfície, humidade relativa e qualidade do ar (CO_2 , CO). Neste trabalho, utilizou-se a sonda humidade/temperatura registo para registar a temperatura e humidade relativas nas câmaras reverberantes (Fig. 4.3) [52].



Figura 4.3 - Termo Higrómetro *TESTO* 435-2 e sonda humidade/temperatura [Foto do autor]

4.2.1.2 Condições de medição

A medição laboratorial do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea de um elemento teste é realizada em duas câmaras reverberantes contíguas, sendo uma designada de câmara emissora e outra de câmara recetora. O elemento teste, neste trabalho a porta exterior, é montado na parede de gesso cartonado tripla (Fig. 4.4), com 430 mm de espessura, 10,9 m² de área superficial e um índice de redução sonora (R_w) de 70 (-3; -10) dB, que divide as duas câmaras reverberantes.



Figura 4.4 - Parede de gesso cartonado tripla, antes da montagem da porta (aro e pré-aro)
[Fotos do autor]

As câmaras reverberantes têm uma forma trapezoidal, tendo a câmara emissora 106 m³ e a recetora 205 m³ de volume. A forma irregular das câmaras reverberantes minimiza a formação de ondas sonoras estacionárias (Fig. 2.20), ou seja, fomenta a formação de um campo sonoro difuso. Na câmara recetora, com o objetivo de garantir ainda mais um campo sonoro difuso, existem cinco difusores sonoros espalhados pela câmara (Fig. 4.5).

O intervalo de tempo de reverberação ideal para as medições do isolamento sonoro de um elemento construtivo, segundo a norma ISO 10140-5 [6], depende do volume da câmara reverberante recetora e pode ser calculado pela expressão 4.1, sendo que para a câmara recetora R1, com 205 m³, o tempo de reverberação, em cada frequência, deve estar dentro do intervalo de 1,0 e 5,1 segundos.

$$1 \leq TR \leq 2 \cdot \left(\frac{V}{50}\right)^{2/3} \leftrightarrow 1 \leq TR \leq 2 \cdot \left(\frac{205}{50}\right)^{2/3} \leftrightarrow 1,0 \leq TR \leq 5,1 \quad (4.1)$$

Sendo:

TR - Tempo de reverberação, para cada banda de frequência 1/3 de oitava, dos 100 aos 5000 Hz (s);

V - Volume da câmara recetora ($\approx 205 \text{ m}^3$).

As câmaras reverberantes, tanto emissora como recetora, cumprem os restantes requisitos impostos na norma ISO 10140-5 [6], que não serão descritos neste trabalho.

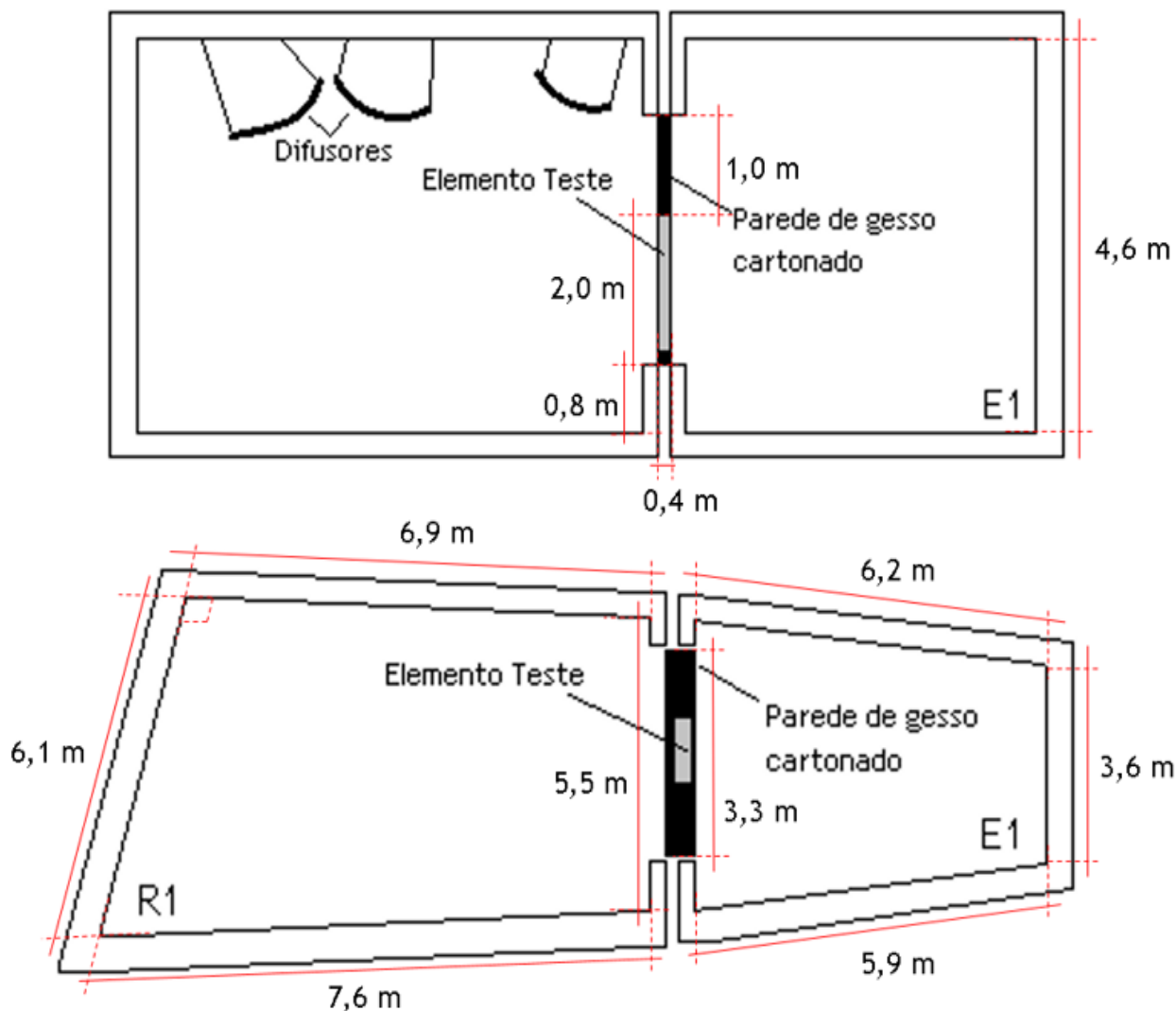


Figura 4.5 -Esquema (sem escala) das câmaras reverberantes, R1: recetora e E1: emissora, corte vertical (em cima), planta (em baixo)

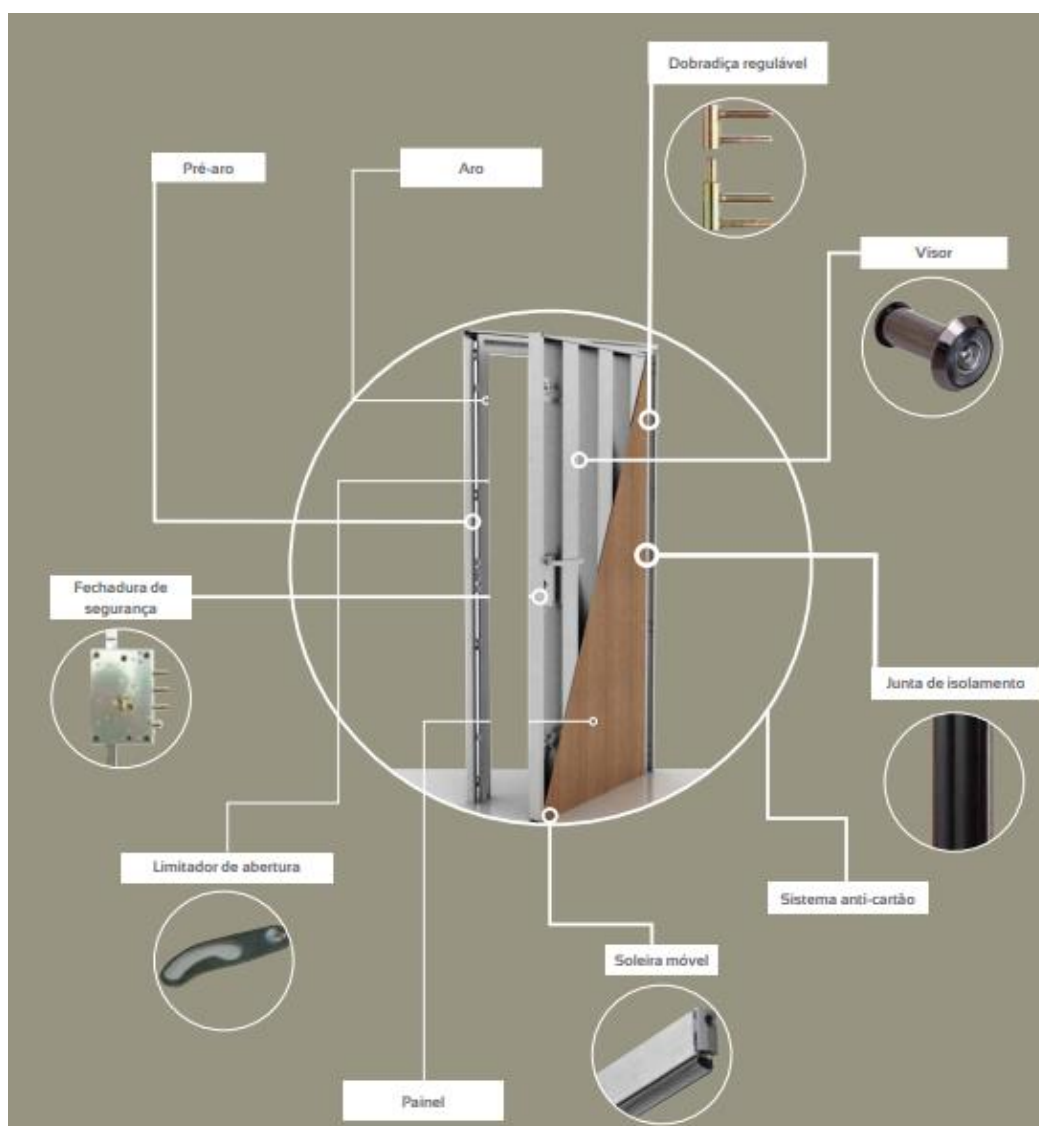
4.2.2. Caracterização da Amostra

4.2.2.1. Estrutura da Porta *Standard* (PS)

Neste trabalho, numa fase inicial, utilizou-se uma porta de segurança *Standard*, da marca *TRANCAR*®, do fabricante *Augusto Moreira, Lda*, com as dimensões apresentadas no quadro 4.2, fabricada para ser utilizada como porta de comunicação com exterior. O sistema de fecho é composto por uma fechadura de segurança, de cinco canhões, um trinque com sistema “anti-cartão”, e limitador de abertura. A porta é também composta por duas dobradiças reguláveis, soleira móvel e um visor. Estruturalmente, a porta é composta por um corpo metálico interno e por dois painéis em contraplacado em ambas as faces (Fig. 4.6).

Quadro 4.2 - Dimensões da porta *Standard*

Dimensões	Vão de Obra	Porta	Vão útil
Altura (mm)	$2006 \pm 0,5$	$2020 \pm 0,5$	$2000 \pm 0,5$
Largura (mm)	$1020 \pm 0,5$	$890 \pm 0,5$	$886 \pm 0,5$
Área superficial (m ²)	2,046	1,889	1,772
Massa (kg)	-	70	-
Massa/Área (kg/m ²)	-	38,9	-

Figura 4.6 - Estrutura da porta *Standard* da marca *TRANCAR*®, com todos os seus componentes [53]

A forma do corpo metálico secciona a porta em seis partes, sendo que três são reforços que fortalecem a estrutura da porta e permitem a sua ventilação formando caixas de ar (Fig. 4.7). Estas secções ocupam 0,70 m² da área transversal da porta, ou seja cerca de 47% da área total. As restantes três secções, ocupam 1,03 m² da área transversal da porta (53%), e estão preenchidas por lã de rocha (Fig. 4.8), com um peso específico de 90 kg/m³, de forma a aumentar o isolamento térmico e acústico.

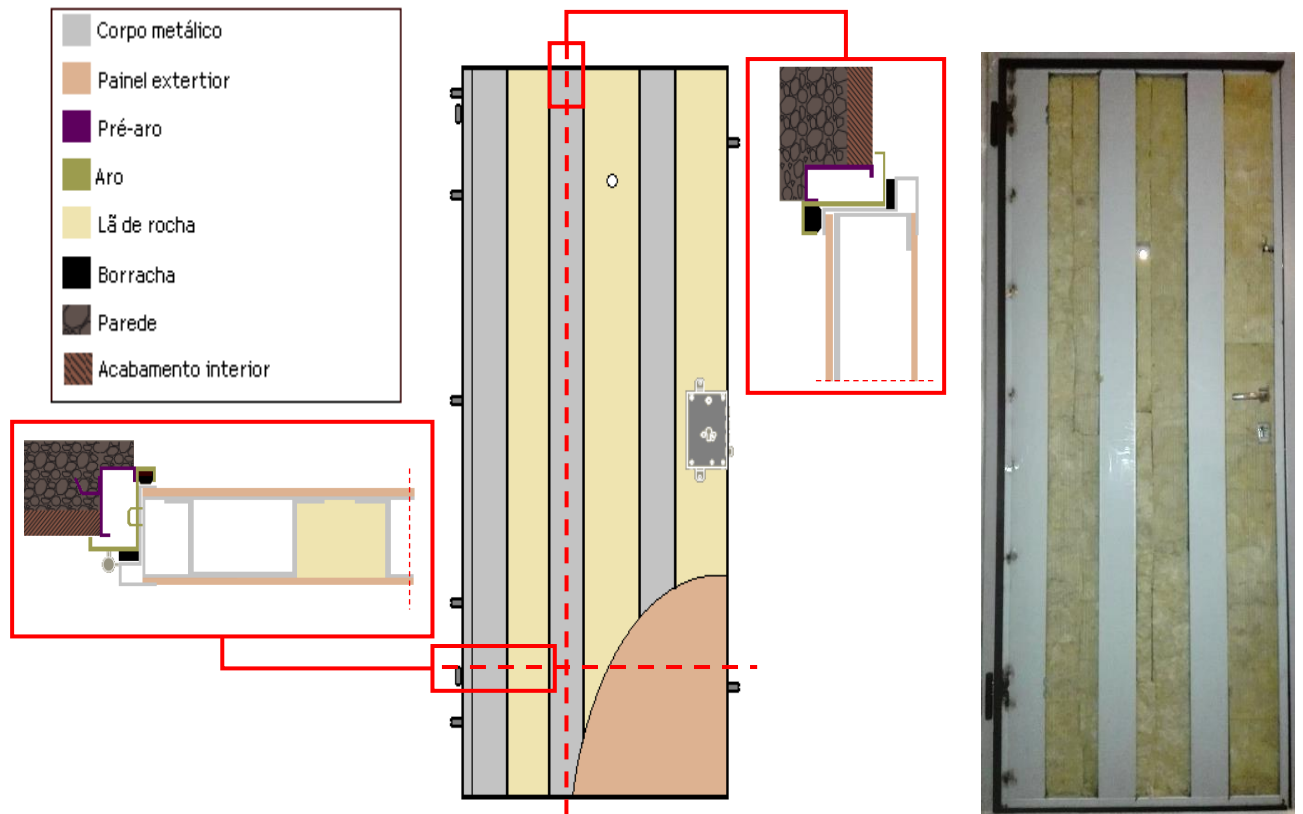


Figura 4.7 - Estrutura interna da porta *Standard* (PS), desenho técnico com corte vertical e horizontal (esquerda), estrutura interna sem o painel externo, vista da câmara recetora (direita) [Figura e foto do Autor]



Figura 4.8 - Placa de lã de rocha (90 kg/m^3) aplicada na porta *Standard* [Foto do autor]

O sistema de colmatação da frincha inferior é composto por uma soleira móvel, que desce quando a porta está na posição fechada. A soleira é constituída por três fitas de borracha ao longo de todo o comprimento da soleira que são comprimidas quando a porta é fechada de

forma a vedar a frincha inferior (Fig. 4.9). As frinchas no restante perímetro da porta, laterais e superior, são vedadas por uma junta de isolamento (Fig. 4.6).



Figura 4.9 - Porta *Standard* (PS) fechada: detalhe da colmatação da frincha inferior (em cima); Porta inicial aberta, detalhe da soleira móvel com três tiras de borracha (em baixo)
[Fotos do autor]

4.2.2.2. Montagem da Porta

Previamente às medições, procedeu-se à abertura da parede (gesso cartonado) entre câmaras reverberantes (Fig. 4.10) e à montagem do elemento teste (porta) entre as câmaras. De forma a fixar a porta, foi necessário a instalação, primeiro de um pré-aro e depois do aro, que são a estrutura suporte da porta e possibilitam o seu funcionamento, abertura e fecho. Após a instalação do pré-aro, procedeu-se ao preenchimento dos espaços vazios entre a parede entre câmaras reverberantes e o pré-aro, com lã de rocha, de forma a evitar a transmissão sonora por estes espaços e assegurar que o som apenas se transmite através do elemento teste (Fig. 4.11). Tal como indicado na norma ISO 10140-5 [6], a porta deve ser instalada de forma a que esta possa ser aberta e fechada, pelo menos cinco vezes (Fig. 4.12).

4.2.2.3. Estrutura da Porta *Standard* Melhorada (PSM)

Posteriormente à determinação do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea da porta, com vista a melhorar o isolamento sonoro da porta *Standard*, instalou-se uma porta, denominada de *Standard* Melhorada (PSM), do mesmo fabricante, com algumas alterações estruturais sugeridas pelo autor deste trabalho. A sua montagem procedeu-se de igual forma à anterior porta (subcapítulo 4.2.2.2). A estrutura desta porta é muito semelhante à porta *Standard*, no entanto as estruturas metálicas que servem de reforço (“caixas de ar”) estão 20 mm mais recuadas, o que permite a instalação de telas entre a estrutura metálica e o painel exterior (Fig. 4.13). Além disso utilizou-se *Aglomerado 120kg* [9](Fig. 4.14) para enchimento dentro e fora dos reforços e aplicou-se uma placa de 20 mm do mesmo material entre a estrutura metálica e o painel exterior. Preferiu-se o aglomerado à lã de rocha pois o peso específico do aglomerado é muito superior ao da lã de rocha ($144 > 90 \text{ kg/m}^3$).



Figura 4.10 - Abertura da parede entre as câmaras reverberante, vista da câmara recetora
[Foto do autor]



Figura 4.11 - Instalação do pré-aro com detalhes de finalização e preenchimento com lã de rocha [Fotos do autor]



Figura 4.12 - Porta *Standard* (PS) instalada na abertura entre câmaras reverberantes, vista da câmara emissora (duas da esquerda), vista da câmara recetora (duas da direita) [Fotos do autor]

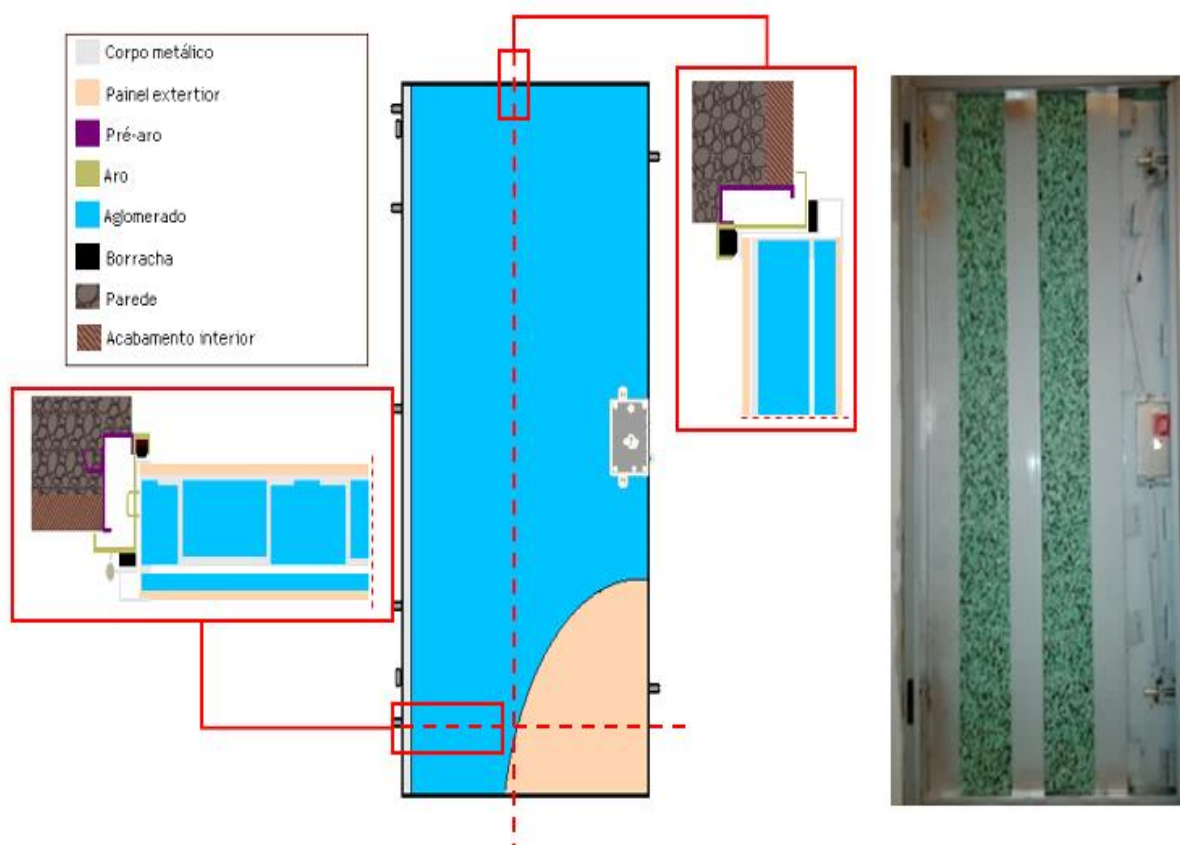


Figura 4.13 - Estrutura interna da porta *Standard* Melhorada (PSM), desenho técnico com corte vertical e horizontal (à esquerda), estrutura interna sem a placa de aglomerado e o painel exterior, vista da câmara recetora (à direita) [Figura e foto do Autor]

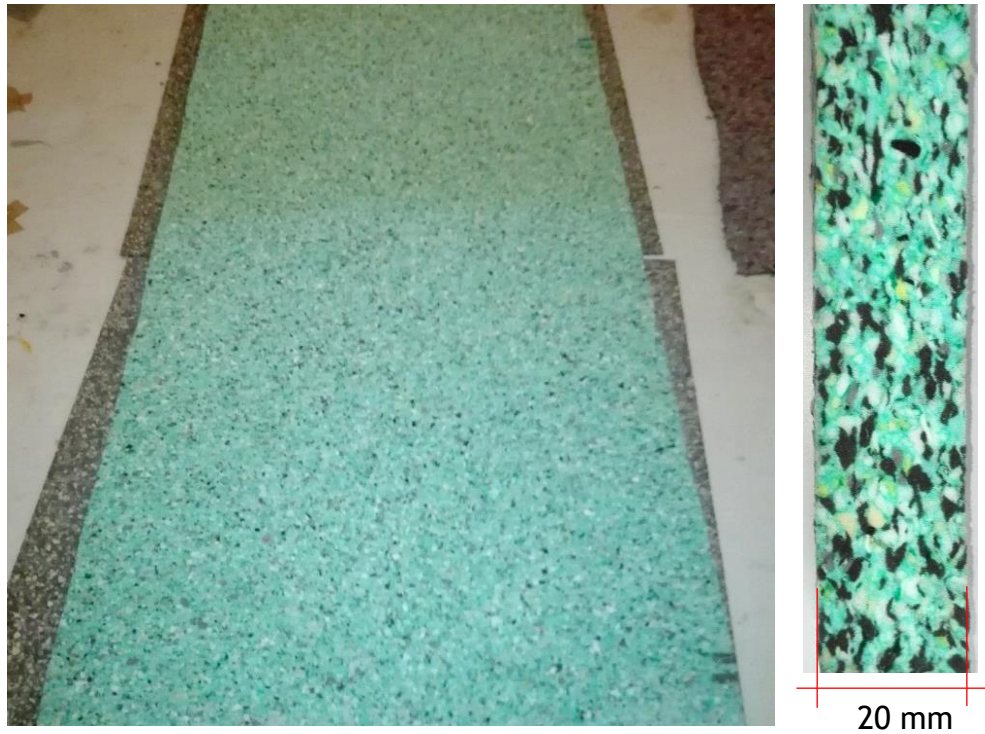


Figura 4.14 - Placa de 20 mm de *Aglomerado 120kg* [9], antes da sua inserção na estrutura interna da porta *Standard Melhorada* (à esquerda), e pormenor da espessura e características da placa (à direita) [Fotos do Autor]

Ao contrário da porta *Standard*, o sistema de colmatação da frincha inferior da PSM é constituído por uma soleira móvel dupla, em vez da soleira móvel simples, ou seja, composto por duas soleiras móveis com três tiras de borracha cada (Fig. 4.15). Por fim, o visor que permite a observação do interior para o exterior foi suprimido.



Figura 4.15 - Sistema de colmatação da frincha inferior da porta *Standard Melhorada* (PSM), soleira móvel dupla com seis tiras de borracha [Foto do Autor]

4.2.2.4. Descrição das Amostras

Com o objetivo de melhorar o isolamento sonoro a ruídos de condução aérea da porta *Standard Melhorada* (PSM) foram testadas seis amostras (Quadro 4.3), sendo que a amostra nº 0 corresponde à porta *Standard* (PS) e serve como base para o estudo das melhorias no isolamento.

De forma a aumentar o isolamento da porta, em primeiro lugar, foram realizadas algumas alterações estruturais na porta, sugeridas pelo autor deste trabalho e descritas do subcapítulo 4.2.2.3, ficando assim com a porta *Standard Melhorada* (PSM) onde, posteriormente, foram colocadas diferentes placas/telas, fornecidas pelo mesmo fabricante da porta, no interior da sua estrutura. Na PSM+Agl (amostra nº 1) foi inserida a placa de 20 mm de *Aglomerado 120kg* [9] (Fig. 4.14) entre a estrutura metálica e o painel exterior. Para a PSM+Agl+Flex (amostra nº 2) e PSM+Agl+EDPM (amostra nº 3) foram colocadas, respetivamente, as telas de 4mm de *Flexitect G+* [10] e *EDPM 130 Negro* [11] (Fig. 4.16) entre a placa de *Aglomerado 120kg* (20 mm) e o painel exterior. Para as PSM+PENA (amostra nº 4), PSM+CP (amostra nº 5) e PSM+MDF (amostra nº 6) retirou-se a placa de *Aglomerado 120kg* e colocou-se, respetivamente, a placa de 20 mm de *PENA 30 FR* [54] (Fig. 4.17), a placa de 19 mm de contraplacado e a placa de 19 mm de MDF (Fig. 4.18) entre a estrutura metálica e o painel exterior.

Quadro 4.3 - Composição interna e características das amostras de porta testadas

Amostra nº	Configuração	Abreviatura	Tipo de tela/placa	Espessura da tela (mm)	Peso específico da tela (kg /m ³)	Massa superficial do conjunto (kg /m ²)
0	Porta <i>Standard</i>	PS	(s/ alteração)	-	-	38,9
1	Porta <i>Standard Melhorada</i> + tela <i>Aglomerado 120kg</i> [9]	PSM+Agl	Tela de <i>Aglomerado 120kg</i>	20	144	63,6
2	Porta <i>Standard Melhorada</i> + tela <i>Aglomerado 120kg</i> + tela <i>Flexitect G+</i> [10]	PSM+Agl+Flex	Tela <i>Flexitect G+</i> com bicamada de adesivo <i>ADV 036</i>	4	10,5	63,9
3	Porta <i>Standard Melhorada</i> + tela <i>Aglomerado 120kg</i> + tela <i>EPDM 130 Negro</i> [11]	PSM+Agl+EPDM	Tela <i>EPDM 130 Negro</i> com bicamada de adesivo <i>ADV RM209</i>	4	140	64,3
4	Porta <i>Standard Melhorada</i> + tela <i>PENA 30 FR</i> [54]	PSM+PENA	Tela <i>PENA 30 FR</i> com camada de adesivo <i>ADV 036</i>	20	33,0	61,6
5	Porta <i>Standard Melhorada</i> + placa de 19 mm de contraplacado	PSM+CP	Placa de contraplacado hidrófuga	19	500	70,2
6	Porta <i>Standard Melhorada</i> + placa de 19 mm de MDF	PSM+MDF	Placa de MDF hidrófuga	19	750	74,9

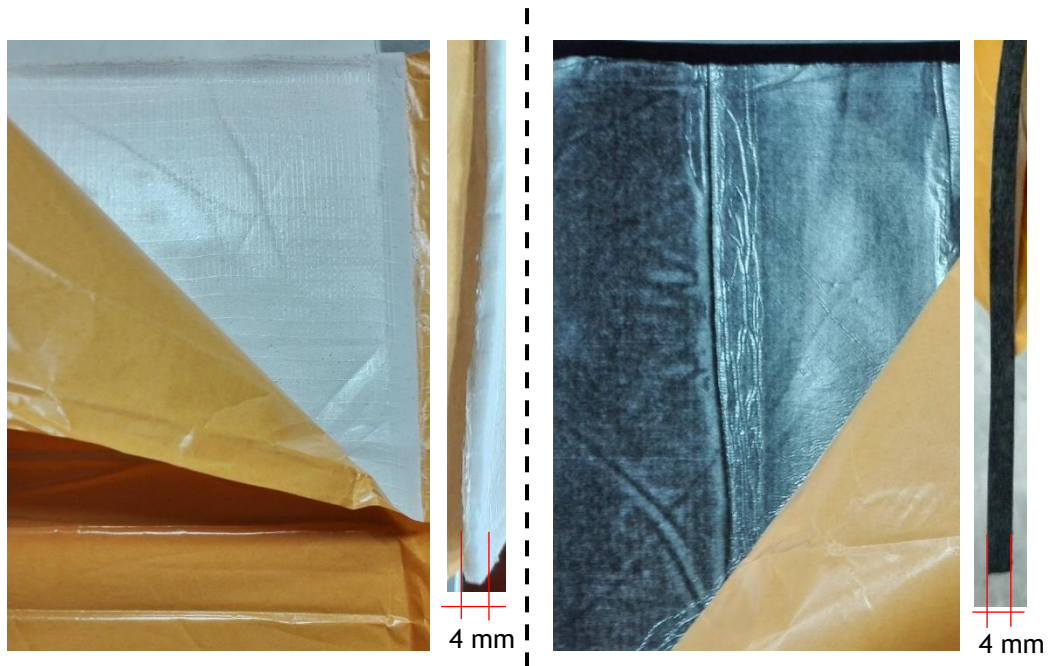


Figura 4.16 - Tela de 4mm de Flexitect G+ [10], com a folha protetora, antes da sua inserção na estrutura interna da porta *Standard* Melhorada e pormenor da espessura e características da placa (à esquerda); Tela de 4mm de EPDM 130 Negro [11], com a folha protetora, antes da sua inserção na estrutura interna da porta *Standard* Melhorada, e pormenor da espessura e características da placa (à direita) [Fotos do Autor]

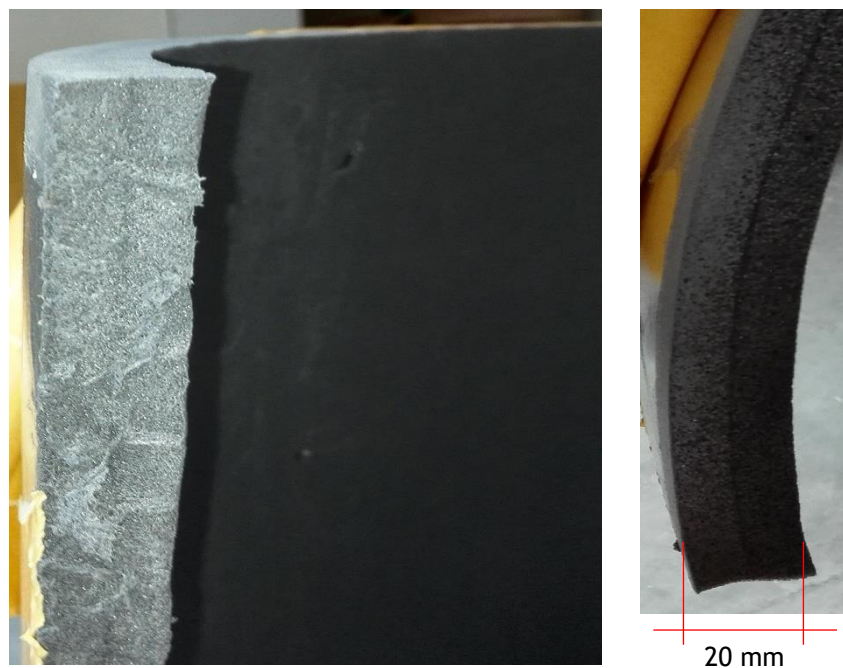


Figura 4.17 - Tela de 20 mm de PENA 30 FR [54] antes da sua inserção na estrutura interna da porta *Standard* Melhorada (à esquerda), e pormenor da espessura e características da placa (à direita) [Fotos do Autor]

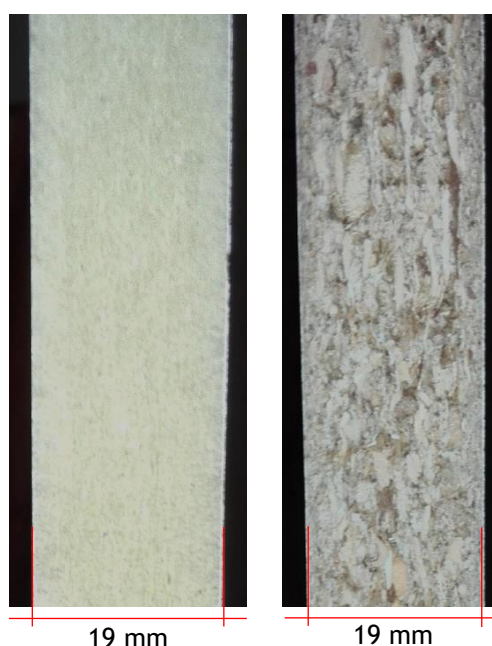


Figura 4.18 - Placa de 19 mm de contraplastado antes da sua inserção na estrutura interna da porta *Standard* Melhorada com pormenor da espessura e características da placa (à direita); Placa de 19 mm de MDF antes da sua inserção na estrutura interna da porta *Standard* Melhorada com pormenor da espessura e características da placa (à esquerda) [Fotos do Autor]

4.2.3. Avaliação do Efeito da Colmatação da Frincha Inferior - pré-amostragem

Segundo Hongisto, quando se pretende melhorar o isolamento sonoro de uma porta deve-se primeiramente determinar o seu ponto mais fraco, ou a sua estrutura interna ou a colmatação das suas frinchas, já que, regra geral, melhorias na estrutura da porta são ineficazes se a diferença de redução sonora entre a porta com e sem a frinchas totalmente tapadas for superior a 3 dB [42, 43].

As propriedades de um bom sistema de colmatação das frinchas são, primeiramente, tapar as aberturas entre a porta e o aro sem ser necessário o uso excessivo de força e assim garantir o correto encaixe da porta no aro; segundo, melhorar o isolamento sonoro da porta, prevenindo a passagem de som pelas frinchas; e por fim, o sistema de colmatação tem de ter uma boa durabilidade, não sendo necessário à sua substituição regular [42, 43].

Portanto, de forma a avaliar a influência da frincha inferior da porta *Standard* (amostra nº 0), procedeu-se a uma medição prévia (não normalizada), na câmara recetora R1, dos níveis de pressão sonora (L_p), para bandas de frequência por terços de oitava dos 100 aos 5000 Hz, da PS com a frincha inferior tapada apenas com o sistema de colmatação da frincha inferior simples (embutido na construção da porta) (Fig. 4.9), e a mesma com a frincha inferior com ainda uma tira de esponja adaptada (com 10 mm de espessura e 890 mm de comprimento) (Fig. 4.19).

Os três microfones foram posicionados na câmara recetora em linha, com alturas distintas, próximos do elemento teste (porta), de forma a captar melhor a possível transmissão sonora pela frincha inferior (Fig. 4.20, Quadro 4.4).



Figura 4.19 - Inserção da tira de esponja na frincha inferior da porta inicial *Standard* (à esquerda); Pormenor da espessura da tira de esponja, 10 mm (à direita) [Fotos do autor]

Quadro 4.4 - Posição e alturas (m) dos microfones, segundo os pontos A, B e C marcados na figura 4.20, para os ensaios com a frincha inferior da porta *Standard* selada (s/ frincha inferior) e com a frincha destapada (c/ frincha inferior)

Ensaio nº	Medição	Posição	s/ frincha inferior	c/ frincha inferior
			Altura (m)	Altura (m)
1	1	C	1,68	1,98
	2	B	1,98	1,20
	3	A	1,20	1,68
2	4	C	1,20	1,20
	5	B	1,68	1,68
	6	A	1,98	1,98
3	7	C	1,98	1,68
	8	B	1,20	1,98
	9	A	1,68	1,20

Para que se possa fazer a comparação entre os valores de nível de pressão sonora obtidos com a frincha inferior selada, e os níveis de pressão sonora obtidos com a frincha destapada, tanto a orientação como a intensidade das fontes sonoras, na câmara emissora, mantiveram-se constantes ao longo desta avaliação.

Além da avaliação do efeito da frincha inferior no isolamento sonoro da porta inicial, com a tira de esponja adaptada utilizada na avaliação anterior (Fig. 4.19), avaliou-se e comparou-se o desempenho de outros materiais “tapa-frinchas” comerciais, nomeadamente a borracha adesiva *AXTON* e o rolo duplo *Tesa MOLL* (Quadro 4.5). A escolha destes “tapa-frinchas” comerciais utilizados foi baseada nos resultados obtidos por Cunha [16] onde se obtiveram melhorias no índice de redução sonora ($D_{nT,w}$), de até 5 dB.

Para esta avaliação e comparação do efeito dos “tapa-frinchas” comerciais, utilizou-se a mesma metodologia adotada na avaliação da frincha inferior com a tira de esponja adaptada (Fig. 4.20, Quadro 4.4).

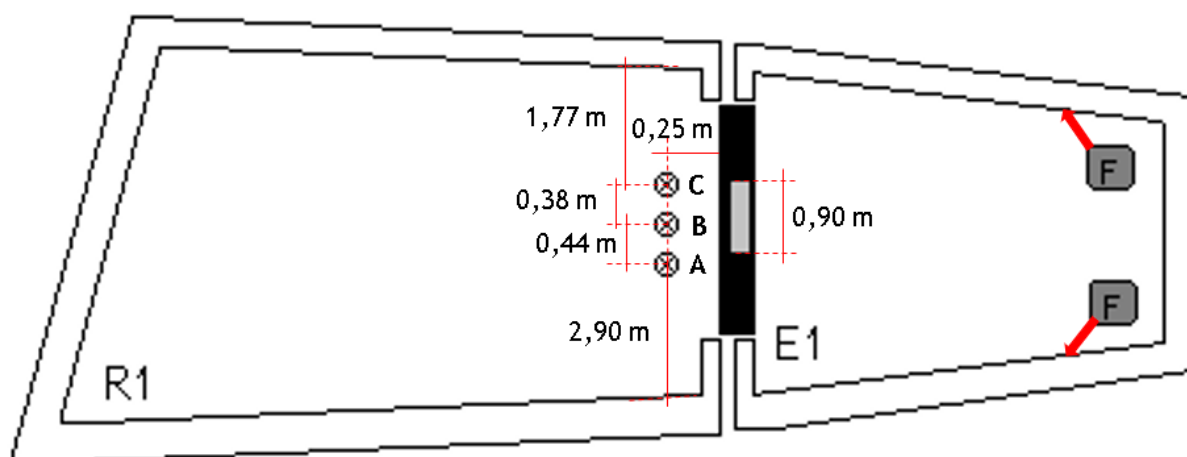



Figura 4.20 - Esquema (sem escala) das câmaras reverberantes com a posição e orientação dos microfones (A, B e C) e das fontes sonoras F, para avaliação da influência da frincha inferior da porta *Standard*

Quadro 4.5 - Descrição dos materiais “tapa-frinchas” comerciais utilizados para avaliação e comparação do efeito da colmatação da frincha inferior da porta inicial *Standard* [Fotos de adaptadas de 16]

Material		Aplicação	Comprimento (mm)
Rolo duplo Tesa MOLL (RD)		Encostado na face da porta do lado da câmara emissora	890
Borracha adesiva AXTON		Aplicado apenas na face da porta do lado da câmara emissora	890

4.2.4. Avaliação do Isolamento Sonoro das Diferentes Composições Internas da Porta *Standard* Melhorada (PSM) - amostragem

Previamente às medições do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea, tanto da parede entre câmaras reverberantes, antes do seu corte e colocação do elemento-teste, como dos tipos de amostras de porta (Quadro 4.3), foram medidos o ruído de fundo e o tempo de reverberação na câmara recetora segundo as normas ISO 10140-4 e 3382-2, respetivamente [4, 55].

A partir dos resultados obtidos na avaliação do efeito da frincha inferior no isolamento sonoro da porta *Standard* (PS, amostra nº 0) (Fig. 5.4), pode-se verificar que uma grande parte da energia sonora (cerca de 5 dB) passa através da frincha inferior da porta, particularmente nas frequências mais audíveis ao ser humano (500 aos 3000 Hz). Assim, de forma a colmatar completamente a frincha inferior e, como tal, ser possível avaliar de forma correta o efeito da posterior inserção das diferentes telas/placas na estrutura da porta, com objetivo de melhorar o isolamento sonoro da porta, foi utilizada a mesma “tapa-frinchas” de esponja adaptado (Fig. 4.19) nas medições do isolamento sonoro de todas as amostras de porta testadas, ou seja,

nestas amostras além do sistema de colmatação da frincha inferior já embutido na construção da porta, foi inserido o “tapa-frinchas” de esponja adaptado.

Para a parede entre câmaras reverberantes e para cada amostra (apresentada no quadro 4.3) mediu-se o nível de pressão sonora (L_p) em ambas as câmaras reverberantes. Realizou-se apenas uma vez as medições do nível de pressão sonora na câmara emissora, já que, para todos os ensaios, a intensidade das fontes emissoras não se alterou.

De forma a cumprir os requisitos impostos pela norma ISO 10140-4 [4], os três microfones utilizados (Fig. 4.1) foram posicionados nos pontos indicados no esquema da figura 4.21, a diferentes alturas, sendo que para cada amostra de porta realizaram-se seis ensaios, três com as fontes sonoras na direção A e três com a direção B, perfazendo um total de 18 medições do nível pressão sonora (3 microfones \times 6 ensaios), em cada câmara reverberante, para cada câmara reverberante. As posições dos microfones utilizadas em cada ensaio estão apresentadas no quadro 4.6. Para se obter uma boa representatividade dos resultados, para todos os ensaios realizados, foi repetido o mesmo processo de amostragem, pontos e alturas e direccionalidade dos microfones.

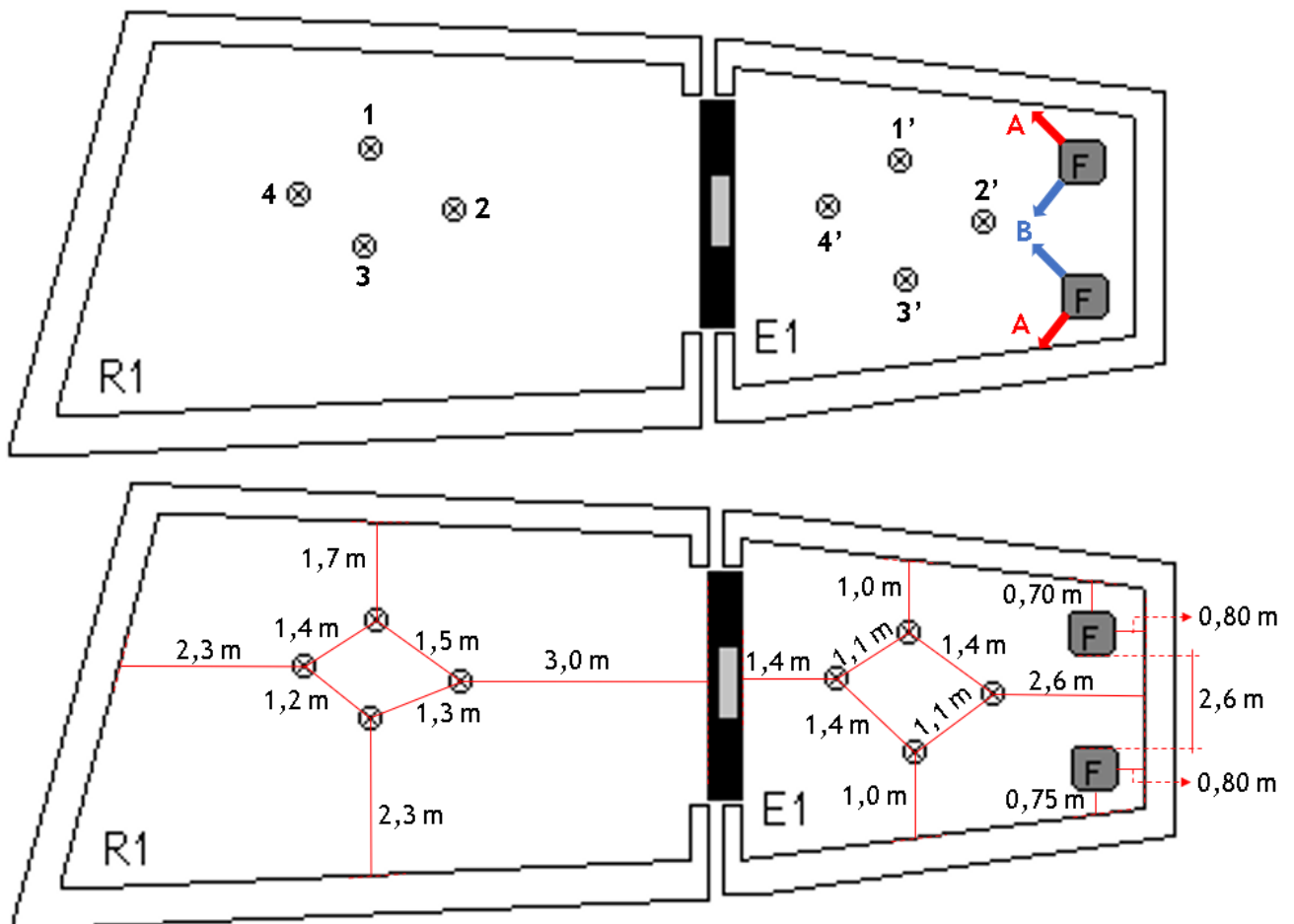


Figura 4.21 - Esquema (sem escala) dos pontos de posicionamento dos microfones e das fontes sonoras, em ambas as câmaras reverberantes, R1 - recetora e E1 - emissora (corte horizontal)

com as respectivas distâncias relativas (em cima), com identificação dos pontos dos microfones e direccionalidade das fontes sonoras (em baixo)

Após as medições dos níveis de pressão sonora, da câmara emissora e recetora, de cada amostra procedeu-se ao cálculo do índice de redução sonora (R_w) segundo a metodologia descrita no subcapítulo 4.2.5.

Quadro 4.6 - Posição dos microfones (Fig. 4.21), e alturas, em ambas as câmaras reverberantes, para cada ensaio

Ensaio	Medição	Câmara emissora			Câmara recetora		
		Posição (Fig. 4.20)	Altura (m)	Orientação das fontes sonoras (Fig. 4.20)	Posição (Fig. 4.20)	Altura (m)	Orientação das fontes sonoras (Fig. 4.20)
1	1	1'	1,68	B	1	1,68	A
	2	4'	1,98		2	1,98	
	3	3'	1,20		3	1,20	
2	4	2'	1,68	B	4	1,68	A
	5	3'	1,98		3	1,98	
	6	1'	1,20		1	1,20	
3	7	2'	1,68	B	4	1,68	A
	8	1'	1,98		1	1,98	
	9	3'	1,20		3	1,20	
4	10	2'	1,68	A	4	1,68	B
	11	1'	1,98		1	1,98	
	12	3'	1,20		3	1,20	
5	13	2'	1,68	A	4	1,68	B
	14	3'	1,98		3	1,98	
	15	1'	1,20		1	1,20	
6	16	1'	1,68	A	1	1,68	B
	17	4'	1,98		2	1,98	
	18	3'	1,20		3	1,20	

4.2.5. Metodologia de Cálculo

Neste trabalho, para determinar o índice de redução sonora ponderado (R_w), de cada amostra de porta, utilizou-se o seguinte método de cálculo, segundo as normas EN ISO 10140 (parte 2 e 4) [4, 5] e NP EN ISO 717-1 [8]:

1. Medição do tempo de reverberação (TR) da câmara reverberante recetora, em bandas de frequência 1/3 oitava dos 100 aos 5000 HZ, segundo a norma NP EN ISO 3382-2 [55] e cálculo a absorção sonora equivalente para cada frequência, pela fórmula de Sabine (expressão 4.2);

$$A = \frac{0,16 \cdot V}{TR} \quad (4.2)$$

Sendo:

A - Absorção sonora equivalente, para cada banda de frequência (m^2);

V - Volume da câmara reverberante recetora (m^3);

TR - Tempo de reverberação (s).

2. Medição dos níveis de ruído de fundo da câmara reverberante recetora (L_r “ruído de fundo”), para cada banda de frequência (1/3 de oitava dos 100 aos 5000 Hz);
3. Medição do nível de pressão sonora de cada microfone, em ambas as câmaras reverberantes emissora e recetora, para cada banda frequência (1/3 de oitava dos 100 aos 5000 Hz), para cada medição;
4. Cálculo da média energética do nível de pressão sonora a partir dos níveis de pressão medidas em cada posição, para cada banda de frequência (expressão 4.3);

$$L_{f+r} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right) \quad (4.3)$$

Sendo:

L_{f+r} - Nível de pressão sonora (fontes + ruído de fundo) (dB);

L_1, L_2, \dots, L_n - Níveis de pressão sonora de cada medição (dB);

n - Número de diferentes posições dos microfones ($=18$).

5. Correção dos valores de nível de pressão sonora com ruído de fundo da câmara recetora, se a diferença entre o nível de pressão sonora do ruído de fundo e o nível de pressão sonora das fontes com ruído de fundo for inferior a 6 dB, o ruído de fundo pode ser negligenciado, caso contrário deve a diferença deve ser considerada (expressão 4.4);

$$L = 10 \cdot \log \left(10^{L_{f+r}/10} - 10^{L_r/10} \right) \quad (4.4)$$

Sendo:

L - Nível de pressão sonora corrigido, sem ruído de fundo (dB), para cada frequência;

L_{f+r} - Nível de pressão sonora, com ruído de fundo (dB);

L_r - Nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB).

6. Calcular a redução sonora (R), para cada banda de frequência, através da diferença entre o nível de pressão sonora entre a câmara emissora e a câmara recetora (expressão 4.5);

$$R = L_E - L_R + 10 \cdot \log \left(\frac{S}{A} \right) \quad (4.5)$$

Sendo:

R - Redução sonora, para cada banda de frequência (dB);

L_E - Nível de pressão sonora da câmara emissora, para cada banda de frequência (dB);

L_R - Nível de pressão sonora da câmara recetora, para cada banda de frequência (dB);

S - Área superficial da amostra (porta) (m^2);

A - Absorção sonora equivalente da câmara R1, para cada banda de frequência (m^2).

7. Repetir as alíneas 3 a 6 para a parede entre as câmaras reverberantes (antes da abertura e colocação do elemento teste), de forma a obter a sua redução sonora e contabilizar as transmissões marginais (R_m), e para cada amostra de porta a testar (Quadro 4.3), de forma a obter a redução sonora do conjunto parede e porta (R_{conj});
8. Cálculo da redução sonora da amostra de porta (R), pela diferença energética entre a redução sonora da parede entre as câmaras reverberantes e a redução sonora do conjunto parede e porta (expressão 4.6), se a diferença aritmética entre estas reduções for igual ou superior a 6 dB. Caso contrário, as transmissões marginais pela parede entre as câmaras reverberantes podem ser negligenciadas;

$$R = -10 \cdot \log \left(10^{-R_{conj}/10} - 10^{-R_{marg}/10} \right) \quad (4.6)$$

Sendo:

R - Redução sonora da porta (dB);

R_{conj} - Redução sonora do conjunto parede e porta (dB);

R_{marg} - Redução sonora da parede tripla de gesso cartonado (entre as câmaras reverberantes), de forma a contabilizar as transmissões marginais (dB).

9. Obtenção do índice de redução sonora ponderado (R_w), tanto para a parede entre as câmaras reverberantes, como para as amostras de porta a testar, ajustando os valores de redução sonora, arredondados à décima, de cada banda de frequência, à curva de referência normalizada segundo a norma NP EN ISO 717-1 [8], de cada amostra (Quadro 4.7 e Fig. 4.22), por patamares de 1 dB, de modo a que a soma dos desvios desfavoráveis (valores positivos da diferença entre os valores de redução sonora medidos e os valores da curva de referência) seja a maior possível mas não superior a 32,0 dB. O valor da ordenada da curva de referência ajustada, correspondente à banda de frequência dos 500 Hz, corresponde ao índice de redução sonora ponderado (R_w);
10. Cálculo dos termos de adaptação C , para ruídos de espectro semelhante aos ruído rosa, e C_{tr} , para ruído de tráfego, a partir dos espectros apresentados no quadro 4.7 (expressão 4.7). O cálculo destes termos de adaptação justifica-se devido ao elemento teste ser uma porta de madeira exterior, e como tal estará sujeita à incidência de vários ruídos, como por exemplo ruídos de tráfego, com espectros com elevada energia nas baixas frequências.

$$C_j = -10 \cdot \log \left(\sum 10^{\left(\frac{L_{ij} - R_i}{10} \right)} \right) - R_w \quad (4.7)$$

Sendo:

i - Banda de frequência de 1/3 de oitava, dos 100 aos 3150 Hz;

j - Espectro de adaptação utilizado ($1 = C$; $2 = C_{tr}$);

L_{ij} - Níveis de pressão sonora referidos nos espectros indicados no quadro 4.7 para a banda de frequência i e espectro de adaptação j (dB);

R_i - Redução sonora, para banda de frequência i e espectro de adaptação j (dB);

R_w - Índice de redução de sonora ponderado, ajustado pelo método acima indicado (dB);

C_j - Termo de adaptação para cada espectro j .

Quadro 4.7 - Valores da curva de referência e níveis de pressão sonora $L_{i,j}$ para os espectros de adaptação nº 1 (C) e nº 2 (C_{tr}), nas bandas de 1/3 de oitava, para ruídos de condução aérea [adaptado de 8]

Bandas de frequência de 1/3 oitava (Hz)	Curva de referência (dB)	Níveis de pressão Sonora $L_{i,j}$ (dB)	
		Espectro nº 1 (C)	Espectro nº 2 (C_{tr})
100	33	-29	-20
125	36	-26	-20
160	39	-23	-18
200	42	-21	-16
250	45	-19	-15
315	48	-17	-14
400	51	-15	-13
500	52	-13	-12
630	53	-12	-11
800	54	-11	-9
1000	55	-10	-8
1250	56	-9	-9
1600	56	-9	-10
2000	56	-9	-11
2500	56	-9	-13
3150	56	-9	-15

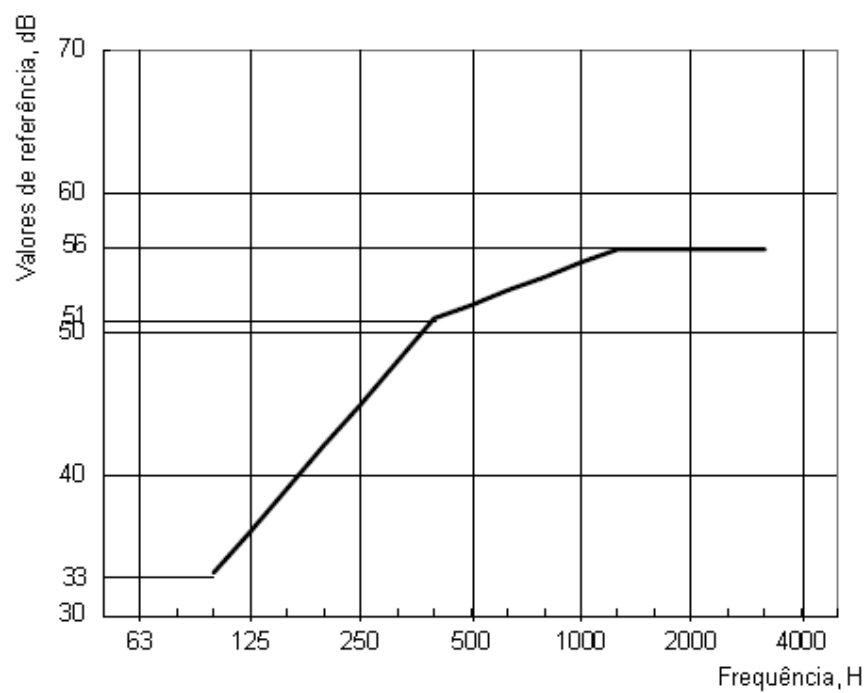


Figura 4.22 - Curva dos valores de referência para sons de condução aérea para banda de frequência de 1/3 de oitava [8]

5.

Apresentação dos Resultados e Discussão

5.1. Condições Iniciais

5.1.1. Tempo de Reverberação e Absorção Sonora Equivalente

Os valores do tempo de reverberação, para a câmara recetora R1, para cada banda de frequência por 1/3 de oitava dos 100 aos 5000 Hz, apresentados na figura 5.1 e no quadro 5.1, decrescem à medida que a frequência aumenta, sendo que o valor máximo (5 s) é para a frequência mais grave (100 Hz), e o mínimo (1 s) ocorre na frequência mais aguda (5000 Hz).

Segundo a norma EN ISO 10140-5 [6], os valores permitidos para o tempo de reverberação dependem do volume da câmara reverberante, sendo que, neste trabalho, este deve estar entre 1,0 e 5,1 s, calculados pela expressão 4.1 (subcapítulo 4.2.1.2). Portanto, pode-se afirmar que o tempo de reverberação cumpre o requisito imposto pela norma europeia.

A partir do tempo de reverberação e utilizando a Fórmula de Sabine (Expressão 4.2), calcula-se a absorção sonora equivalente (m^2), para cada banda de frequência (Quadro 4.1). Os valores de absorção sonora equivalente são depois utilizados para calcular a redução sonora (R em dB) de cada amostra, para cada banda de frequência (Expressão 4.5).

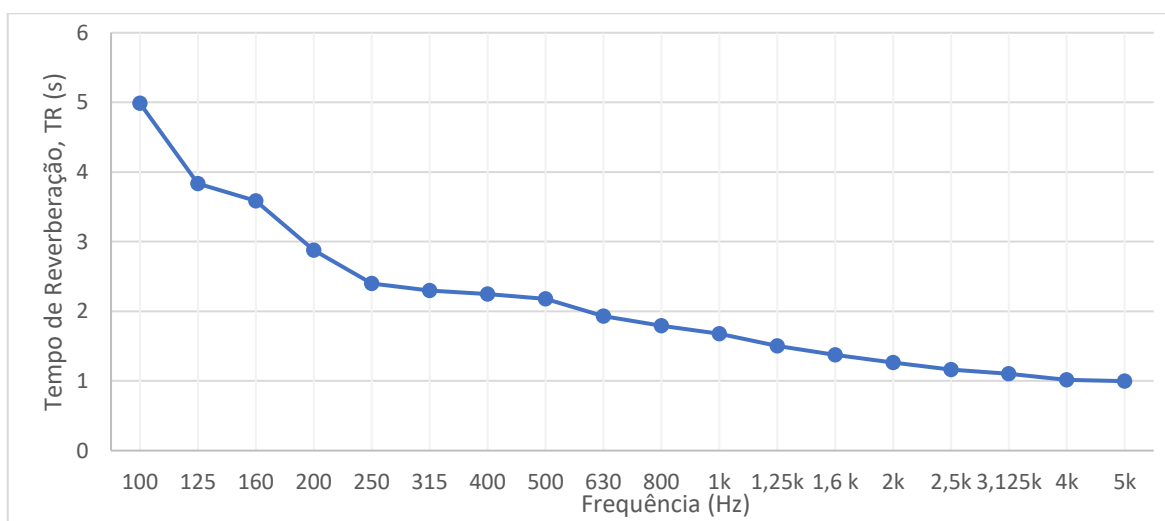


Figura 5.1 - Tempos de reverberação médios em função da frequência (bandas de 1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz), da câmara recetora R1

Quadro 5.1 - Tempos de reverberação médios e absorção sonora equivalente, na câmara recetora R1, calculada pela fórmula de Sabine (expressão 2.30), em função da frequência (bandas de 1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz)

Frequência (Hz, 1/3 oitava)	TR (Tempo de reverberação médio, s)	A (absorção sonora equivalente, m ²)
100	4,99 +	6,63 -
125	3,84	8,82
160	3,59	9,37
200	2,88	10,97
250	2,40	13,62
315	2,30	14,06
400	2,25	14,06
500	2,18	15,01
630	1,93	16,80
800	1,79	18,66
1000	1,68	19,96
1250	1,50	22,10
1600	1,37	23,53
2000	1,26	25,63
2500	1,16	28,21
3150	1,11	29,59
4000	1,01	31,49
5000	1,00 -	32,37 +

5.1.2. Ruído de Fundo

Tal como descrito na norma europeia EN ISO 10140-4 [4], procedeu-se à medição do ruído de fundo para a câmara recetora R1, de forma a assegurar que as medições não foram afetadas pelo ruído de fundo.

Os valores do nível de pressão sonora de ruído de fundo L_r (dB), na câmara recetora, apresentados no quadro 5.2, são muito reduzidos em todo o espectro de frequências (100 aos 5000 Hz). O valor máximo é de 11,8 dB para a frequência central de 100 Hz, havendo um decréscimo abrupto para o valor mínimo do ruído de fundo (5,7 dB) na banda de frequência dos 200 Hz.

5.1.3. Parede de Fecho entre as Câmaras Reverberantes (referência)

A parede de gesso cartonado tripla (Fig. 4.4), instalada entre as câmaras reverberantes, tem um índice de redução sonora ponderado (R_w) de 70 (-3; -10) dB (Quadro 5.3).

Na figura 5.2 está representada a redução sonora da parede de fecho entre as câmaras reverberantes para cada banda de frequência (1/3 de oitava, dos 100 aos 5000 Hz). Neste pode-

se verificar que a parede apresenta uma excelente redução sonora nas médias e altas frequências, valores superiores a 70 dB para frequências acima dos 400 Hz, no entanto, nas baixas frequências, existe um grande decréscimo do seu isolamento.

Quadro 5.2 - Níveis de pressão sonora do ruído de fundo, L_r (dB), na câmara recetora R1, para cada frequência bandas de 1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz)

Frequência (Hz, 1/3 oitava)	Ruído de fundo, L_r (dB)
100	11,8 +
125	9,2
160	6,7
200	5,7 -
250	6,5
315	6,6
400	6,1
500	6,9
630	7,3
800	7,9
1000	8,4
1250	8,9
1600	9,6
2000	10,1
2500	10,9
3150	10,9
4000	10,9
5000	11,2
Soma logarítmica	21,6

Relativamente ao termo de adaptação espectral C (ruído rosa, ponderado com filtro A), este apresenta um valor de -3 dB, ou seja, existe um ligeiro decréscimo na curva do isolamento sonoro, para uma banda de frequência, neste caso para os 1000 Hz (Fig. 5.2). Isto pode ser explicado pelo facto de a estrutura da parede de gesso cartonado não ser homogénea em toda a sua área, havendo zonas reforçadas e zonas de fraqueza criadas pelas sucessivas reconstruções anteriores a este trabalho. Isto significa que o índice de redução sonora (R_w) da parede de gesso cartonado, na presença de ruídos rosa, decresceria para os 67 dB.

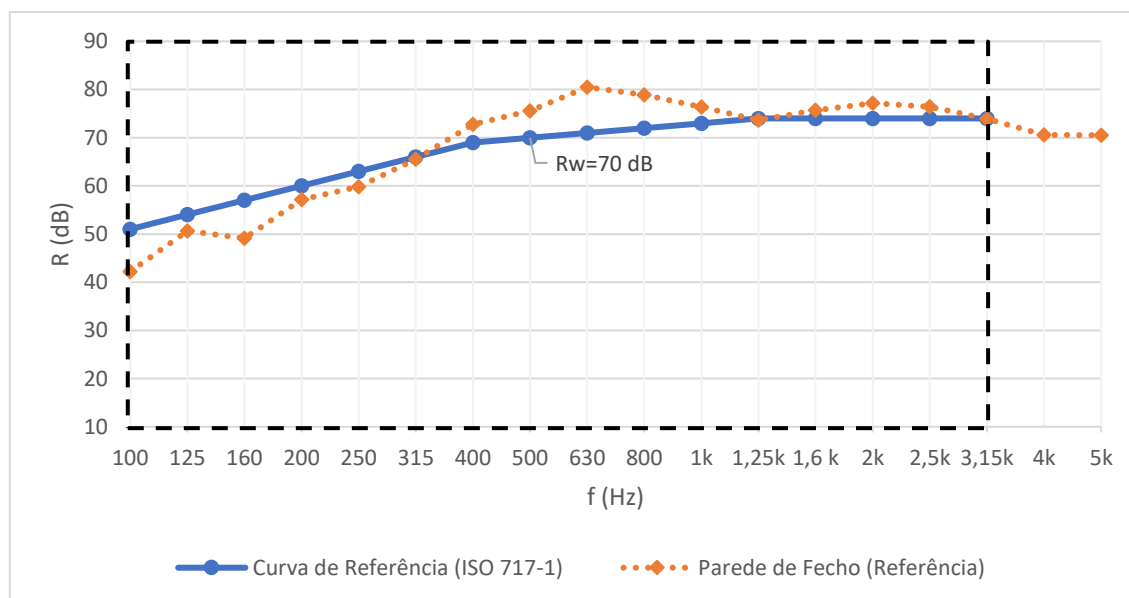
O termo de adaptação espectral C_{tr} (relativo ao ruído de tráfego rodoviário) é igual a -10, o que significa que a presente parede de fecho entre as câmaras reverberantes (referência) não apresenta tão bom isolamento sonoro para ruídos de tráfego rodoviário, que se caracterizam pelo espectro sonoro com muita energia nas frequências mais baixas. Portanto, na presença de ruídos de tráfego rodoviário, ou semelhantes, o isolamento sonoro da parede de pladur decairia 10 dB, apresentando um índice de redução sonora R_w de 60 dB.

Quadro 5.3 - Resultados dos ensaios para medição do índice de redução sonora R_w da parede de fecho entre as câmaras reverberantes (referência)

Frequência (Hz, 1/3 oitava)	L_E (dB, câmara emissora E1) *	L_R (dB, câmara recetora R1) *	Redução sonora R (dB)	Curva de referência ** (dB)	
100	86,8	46,8	42,2	51	8,8
125	85,8	36,0	50,7	54	3,3
160	84,4	36,0	49,1	57	7,9
200	89,8	32,6	57,1	60	2,9
250	90,0	29,2	59,8	63	3,2
315	93,3	26,8	65,4	66	0,6
400	93,6	20,4	72,1	69	negativo
500	92,7	14,5	76,8	70	negativo
630	93,6	10,0	81,8	71	negativo
800	91,7	9,2	80,2	72	negativo
1000	89,6	10,6	76,4	73	negativo
1250	87,8	11,1	73,6	74	0,4
1600	90,8	11,7	75,7	74	negativo
2000	93,2	12,3	77,1	74	negativo
2500	93,6	13,0	76,4	74	negativo
3150	92,1	12,5	75,2	74	negativo
4000	89,7	13,2	71,9	-	-
5000	90,3	13,7	71,8	-	-
Total	103,8	47,7	-	-	27,0
R_w (dB)	70				
C (dB)	-3				
C_{tr} (dB)	-10				

(*) Média logarítmica dos ensaios realizados;

(**) Curva de referência adotada da norma NP EN ISO 717-1 [33], para bandas de frequência de 1/3 de oitava.

Figura 5.2 - Valores da redução sonora (R) da parede de gesso cartonado entre as câmaras reverberantes e curva de referência da norma NP EN ISO 717-1 [8], para cada frequência (banda de 1/3 oitava, dos 100 aos 5000 Hz)

5.2. Resultados da Avaliação do Efeito da Colmatação da Frincha Inferior - pré-amostragem

Os resultados do teste não normalizado de avaliação do efeito da colmatação da frincha inferior, com cerca de 10 mm de altura, da porta *Standard* (PS), com “tapa-frinchas” de esponja adaptado (Fig. 4.19), estão apresentados na figura 5.3. Nesta existe uma diminuição, de 1 a 7 dB, dos valores de nível de pressão sonora L_p para as medições com a frincha inferior tapada, principalmente para as bandas de frequência entre 315 e 2500 Hz, sendo que a maior diferença entre o nível de pressão sonora medido com a frincha destapada e o nível de pressão sonora medido com a frincha tapada (8,4 dB) ocorre na banda de frequência dos 1000 Hz.

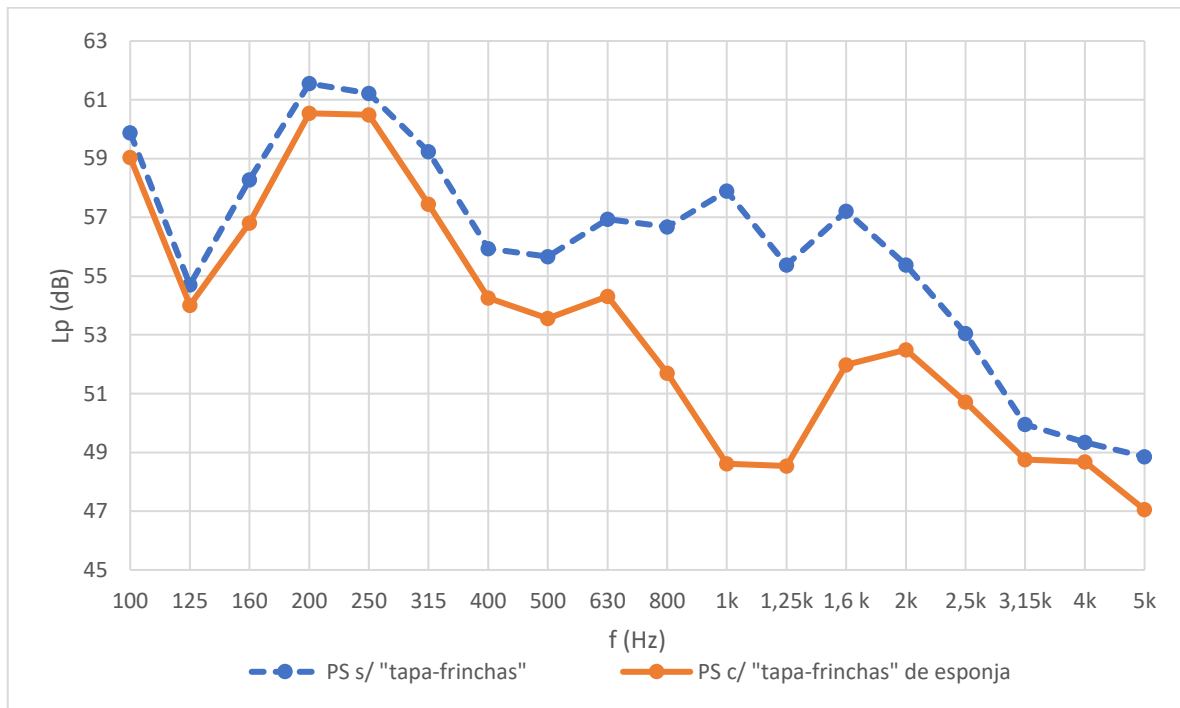


Figura 5.3 -Valores dos níveis de pressão sonora (L_p), para cada banda 1/3 de oitava (100 aos 5000 Hz), medidos na câmara recetora R1, para avaliação do efeito da colmatação da frincha inferior (teste não normalizado), com o “tapa-frinchas” de esponja (Fig. 4.19) no isolamento sonoro a ruídos de condução aérea, na porta *Standard* (PS)

Esta diferença significa que, para as médias frequências, o isolamento da porta é comprometido pela existência da frincha inferior e que a sua colmatação através do “tapa-frinchas” de esponja adaptado (Fig. 4.19) previne a passagem de energia sonora.

Como tal, decidiu-se utilizar do mesmo “tapa-frinchas” nos posteriores ensaios normalizados das amostras de portas avaliadas (Avaliação do Isolamento Sonoro das Diferentes Composições Internas da Porta *Standard* Melhorada (PSM))), para se poder avaliar corretamente as melhorias no isolamento da porta pela inserção das placas na sua estrutura. Contudo, de forma a avaliar o efeito da colmatação da frincha inferior nos ensaios normalizados, e de contabilizá-lo em termos de índice de redução sonora R_w , procedeu-se a alguns ensaios sem a aplicação do “tapa-frinchas”, nomeadamente para a porta *Standard* (PS) e para a porta *Standard* Melhorada com a placa de 20 mm de *Aglomerado 120kg* (PSM+Agl), apresentados no subcapítulo 5.3.

Na figura 5.4 estão apresentados os valores do nível de pressão sonora, medidos na câmara recetora, em função da frequência (bandas 1/3 oitava, dos 100 aos 5000 Hz), da porta *Standard* com a frincha inferior destapada (PS s/ “tapa-frinchas”) e com a frincha inferior tapada com vários materiais: “tapa-frinchas” de esponja adaptado (PS c/ “tapa-frinchas” de esponja); borracha adesiva *Axton* (PS c/ “tapa-frinchas” AXT), e rolo duplo *Tesa MOLL* (PS c/ “tapa-frinchas” MOLL), descritos no quadro 4.5. Para as médias e altas frequências, a colmatação da frincha inferior com os “tapa-frinchas” comerciais tem um efeito positivo no isolamento sonoro da frincha inferior, dado que os níveis de pressão sonora na câmara recetora são inferiores aos da situação da frincha destapada. No entanto, verifica-se que, com a utilização do “tapa-frinchas” de esponja, obtém-se os melhores resultados no isolamento sonoro. Ou seja, a partir destes resultados, pode-se verificar que as soluções “remediativas” (“tapa-frinchas” comerciais”) são menos eficazes no isolamento sonoro total de uma porta do que as soluções “preventivas” que possibilitem a completa estanqueidade das suas frinchas.

Portanto, durante a posterior amostragem não se considerou a utilização dos “tapa-frinchas” comerciais, apenas o “tapa-frinchas” de esponja como anteriormente mencionado.

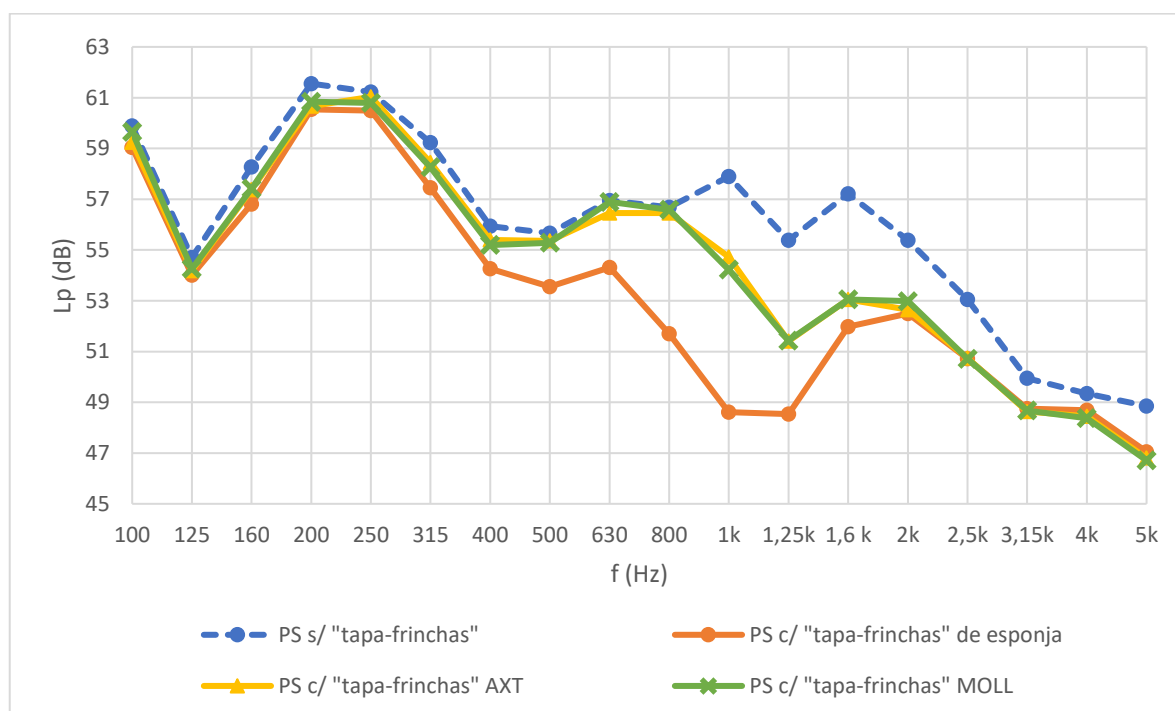


Figura 5.4 -Níveis de pressão sonora (L_p), na câmara recetora R1, para cada banda 1/3 de oitava (100 aos 5000 Hz), medidos na avaliação e comparação entre “tapa-frinchas” comerciais e o “tapa-frinchas” de esponja adaptado (teste não normalizado), nos valores de isolamento sonoro a ruídos aéreos da porta *Standard* (PS)

5.3 Resultados Avaliação do Isolamento Sonoro das Diferentes Composições Internas da Porta *Standard* Melhorada (PSM) - amostragem

Os resultados das medições normalizadas, das diferentes configurações de portas (Quadro 4.3), da redução sonora para cada frequência, os índices de redução sonora R_w e os respetivos termos de adaptação espectral C e C_{tr} , das amostras de portas testadas (Quadro 4.3), estão

apresentados de forma individual e detalhada em Anexo. Nos quadros 5.4. a 5.6 estão apresentados os mesmos resultados de forma conjunta para facilitar a sua análise e comparação.

Relativamente aos resultados da porta *Standard* (PS), apresentados no quadro 5.4, esta obteve 22 dB de índice de redução sonora R_w com a frincha inferior destapada e 27 dB com a frincha colmatada com o “tapa-frinchas” de esponja adaptado (Fig. 4.19). Este aumento de 5 dB no isolamento sonoro da porta significa que, tal como previsto no subcapítulo 5.2, uma grande parte da energia sonora atravessa a porta pela frincha inferior. Pela figura 5.5, e como verificado no subcapítulo 5.1.2, é possível concluir que o efeito da colmatação da frincha inferior aumenta o isolamento global da porta *Standard* (PS), principalmente para as frequências médias (500 a 2000 Hz). No entanto, verifica-se um ligeiro decréscimo do isolamento para as altas frequências.

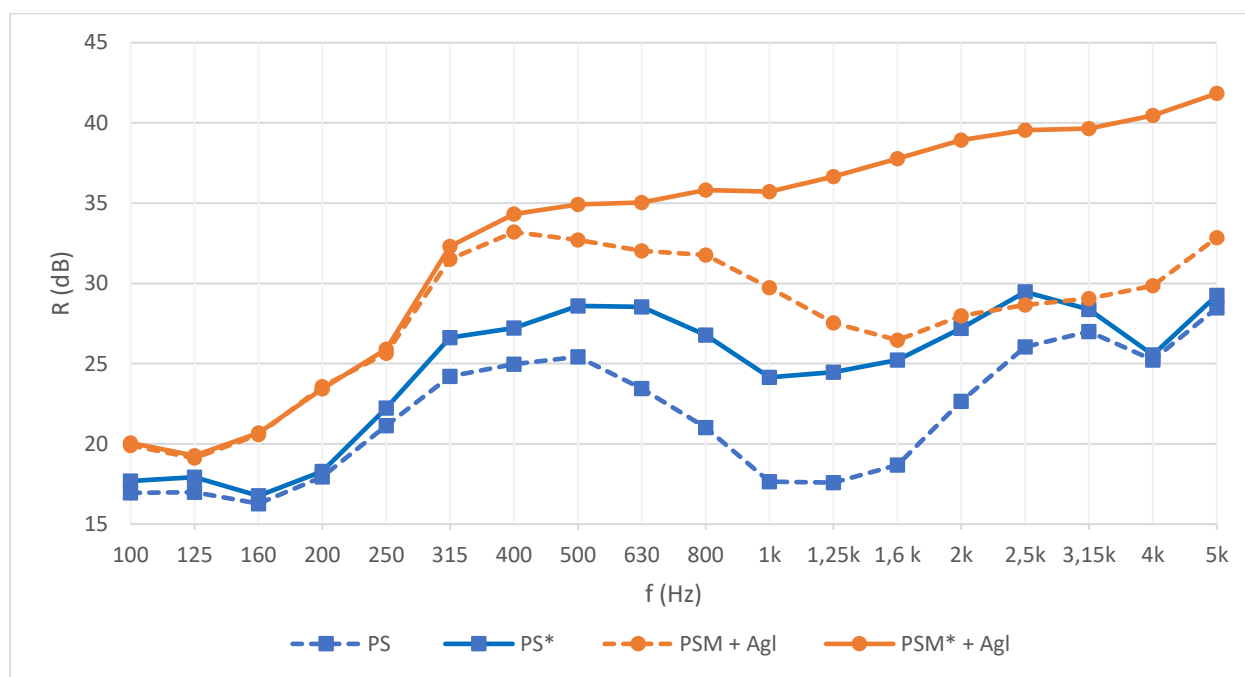
Quadro 5.4 - Valores da redução sonora, R (dB), para banda de frequência (1/3 de oitava, dos 100 aos 5000 Hz); índice de redução sonora R_w (dB); termos de adaptação espectral C e C_{tr} (dB) e respetivas diferenças aritméticas, da porta *Standard* (PS) com e sem o “tapa-frinchas” de esponja adaptado (Fig. 4.19)

Frequência (Hz, 1/3 oitava)	Redução Sonora, R (dB)		Diferença aritmética ΔR e ΔR_w (dB)
	PS	PS*	
100	17,0	17,7	0,7
125	17,0	17,9	0,9
160	16,3	16,8	0,5 -
200	18,0	18,3	0,3 --
250	21,1	22,2	1,1
315	24,2	26,6	2,4
400	25,0	27,2	2,3
500	25,4	28,6	3,2
630	23,5	28,5	5,1
800	21,0	26,8	5,8
1000	17,6	24,2	6,5
1250	17,6	24,5	6,9 ++
1600	18,7	25,2	6,6 +
2000	22,6	27,2	4,6
2500	26,1	29,5	3,4
3150	27,0	28,4	1,4
4000	25,2	25,5	0,3 --
5000	28,5	29,3	0,8
R_w (dB)	22	27	$\Delta R_w = 5$
C (dB)	-1	-1	-
C_{tr} (dB)	-2	-2	-

(*) c/ o “tapa-frinchas” de esponja adaptado (Fig. 4.19) na frincha inferior da porta

A porta *Standard* Melhorada com a placa de 20 mm de *Aglomerado 120 KG* [9] (PSM+Agl) obteve um índice de redução sonora R_w , com a frincha inferior destapada, de 29 dB, e com a frincha tapada pelo mesmo “tapa-frinchas” de esponja utilizado na porta *Standard*, de 36 dB (Quadro 5.5). Neste caso, o efeito da colmatação da frincha inferior aumenta a redução sonora (R) da PSM principalmente a partir dos 500 Hz (aumento em cerca de 2 dB), sendo que a diferença máxima (10,9 dB) ocorre entre os 2000 e 2500 Hz (Fig. 5.5). Para as frequências inferiores a 500 Hz, não se verifica qualquer efeito, no isolamento sonoro, da colmatação da frincha inferior

e, contrariamente aos resultados da porta *Standard* (PS), não se verifica qualquer decaimento nas altas frequências.



(*) c/ o “tapa-frinchas” de esponja adaptado (Fig. 4.19) na frincha inferior da porta

Figura 5.5 - Valores de redução sonora, R (dB), das portas *Standard* (PS) e *Standard Melhorada* (PSM), com e sem o “tapa-frinchas” de esponja adaptado (Fig. 4.19), para cada banda de frequência (1/3 oitava, dos 100 aos 5000 Hz)

Estas diferenças entre efeito da colmatação da frincha inferior da porta *Standard* (PS) e da porta *Standard Melhorada* (PSM) podem ser explicadas pelo facto de a PSM ser já constituída por um sistema de colmatação da frincha inferior de soleira dupla (Fig. 4.15), em vez do sistema de soleira simples da PS (Fig. 4.8). Portanto, pode-se concluir que o sistema de soleira dupla é mais eficaz para as frequências altas, já que a redução sonora (R) da porta *Standard Melhorada* com a frincha inferior tapada não sofreu nenhum decaimento nestas frequências.

Comparando agora o índice de redução sonora (R_w) da porta *Standard* (PS) com o da porta *Standard Melhorada* com a placa de 20 mm de *Aglomerado 120kg* (PSM+Agl), ambas com a frincha inferior destapada (Quadro 5.6), obteve-se um aumento de 7 dB, passando de 22 dB para 29 dB. Para esta situação é possível verificar que existe um aumento da redução sonora (R) em todo o espectro sonoro, sendo que para as frequências médias (entre 400 e 2000 Hz) esse aumento é mais significativo atingindo máximo de diferença na redução sonora (12,1 dB) nos 1000 Hz (Fig. 5.5). Este acréscimo no isolamento sonoro da PSM+Agl é devido às diferenças estruturais entre as portas, das quais: a aplicação de *Aglomerado 120kg* [9] (com elevado peso específico, 144 kg/m³) dentro e fora dos reforços estruturais, cobrindo assim toda a área superficial da porta, que ao contrário da porta *Standard* onde se aplicou lã de rocha (com menor peso específico, 90 kg/m³) apenas fora dos reforços estruturais (57% da área superficial da porta); a aplicação de uma placa de 20 mm de espessura do mesmo aglomerado entre a estrutura metálica e o painel interior; e a utilização de um sistema de colmatação da frincha inferior de soleira duplo (Fig. 4.12), em vez do sistema de soleira simples da PS (Fig. 4.8).

Quadro 5.5 - Valores da redução sonora, R (dB), para banda de frequência (1/3 de oitava, dos 100 aos 5000 Hz); índice de redução sonora R_w (dB); termos de adaptação espectral C e C_{tr} (dB) e respetivas diferenças aritméticas, da porta *Standard* Melhorada com o *Aglomerado* 120kg (PSM+Agl) com e sem o “tapa-frinchas” de esponja adaptado (Fig. 4.19)

Frequência (Hz, 1/3 oitava)	Redução Sonora, R (dB)		Diferença aritmética ΔR e ΔR_w (dB)
	PSM+Agl	PSM*+Agl	
100	19,9	20,1	0,2
125	19,1	19,3	0,2
160	20,6	20,7	0,1
200	23,6	23,4	-0,1 – –
250	25,6	25,9	0,3 –
315	31,5	32,3	0,8
400	33,2	34,3	1,1
500	32,7	34,9	2,2
630	32,0	35,0	3,0
800	31,8	35,8	4,0
1000	29,7	35,7	6,0
1250	27,5	36,7	9,1
1600	26,5	37,8	11,3 + +
2000	28,0	38,9	10,9 +
2500	28,7	39,6	10,9 +
3150	29,1	39,6	10,6
4000	29,9	40,5	10,6
5000	32,9	41,8	9,0
R_w (dB)	29	36	$\Delta R_w = 7$
C (dB)	-1	-1	-
C_{tr} (dB)	-1	-5	-

(*) c/ o “tapa-frinchas” de esponja adaptado (Fig. 4.19) na frincha inferior da porta

De seguida apresenta-se a análise e comparação dos resultados dos ensaios da porta *Standard* Melhorada, com o “tapa-frinchas” de esponja (PSM*), com as diferentes composições internas (Quadro 4.3).

Relativamente à PSM com a placa de *Aglomerado* 120kg [9] e com a tela de 4 mm de *Flexitect* G+ [10] (PSM*+Agl+Flex) e à mesma mas com a tela também de 4 mm de *EPDM* 130 Negro [11] (PSM*+Agl+EPDM), ambas com frincha inferior tapada, não existe um aumento significativo do isolamento sonoro, quando comparadas com a porta *Standard* Melhorada com apenas a placa de *Aglomerado* 120kg, também com o “tapa-frinchas” (PA*+Agl), havendo apenas um acréscimo de 1 dB do índice de redução sonora R_w (Quadro 5.7). Além disso não se obtiveram diferenças significativas na redução sonora ao longo de todo o espectro de frequências, pelo que se pode inferir que a aplicação destas telas não resulta em melhorias significativas do isolamento sonoro a ruídos aéreos da porta *Standard* Melhorada (Fig. 5.6). Isto pode ser explicado pelo facto de a espessura de ambas as telas ser muito baixa (4 mm), e como tal não têm massa suficiente para aumentar o isolamento global da porta. Pode-se ainda concluir que a aplicação destas telas (*Flexitect* G+ e *EPDM* 130 Negro) não alterou a frequência crítica do conjunto porta e placas.

Quadro 5.6 - Valores da redução sonora R (dB), para banda de frequência (1/3 de oitava, dos 100 aos 5000 Hz); índice de redução sonora R_w (dB); termos de adaptação espectral C e C_{tr} (dB) e respetivas diferenças aritméticas, da porta *Standard* (PS) e porta *Standard Melhorada* com o *Aglomerado 120kg* (PSM+Agl) sem o “tapa-frinchas” de esponja adaptado (Fig. 4.19)

Frequência (Hz, 1/3 oitava)	Redução Sonora, R (dB)		Diferença aritmética ΔR e ΔR_w (dB)
	PS	PSM+Agl	
100	17,0	19,9	2,9
125	17,0	19,1	2,1 --
160	16,3	20,6	4,3
200	18,0	23,6	5,6
250	21,1	25,6	4,5
315	24,2	31,5	7,3
400	25,0	33,2	8,2
500	25,4	32,7	7,3
630	23,5	32,0	8,6
800	21,0	31,8	10,8 +
1000	17,6	29,7	12,1 ++
1250	17,6	27,5	10,0
1600	18,7	26,5	7,8
2000	22,6	28,0	5,3
2500	26,1	28,7	2,6 ↓
3150	27,0	29,1	2,1 ↓↓
4000	25,2	29,9	4,6
5000	28,5	32,9	4,4
R_w (dB)	22	29	$\Delta R_w = 7$
C (dB)	-1	-1	-
C_{tr} (dB)	-2	-1	-

A porta *Standard Melhorada* com a tela de 20 mm de *PENA 30 FR (20 mm)* [54] entre a estrutura metálica e o painel exterior, com a frincha inferior colmatada (PSM*+PENA), obteve um índice de redução sonora R_w de 34 dB (Quadro 5.7), ou seja, menos 3 dB do que a melhor solução (37 dB, para as PSM*+Agl+Flex e PSM*+Agl+EPDM). Este decréscimo pode ser explicado novamente através da diferença entre as massas dos elementos aplicados na estrutura da porta, ou seja, apesar de ambas as telas terem a mesma espessura (20 mm), a tela *PENA 30 FR* tem um peso específico inferior ao do *Aglomerado 120kg* ($33 \ll 144 \text{ kg/m}^3$). No entanto, nas frequências altas (a partir dos 2000 Hz) a amostra obteve o mesmo comportamento acústico das amostras anteriores, pelo que o decréscimo do isolamento sonoro se sente apenas para as frequências baixas, sendo que o mínimo de redução sonora, 18,7 dB para os 200 Hz, é equivalente ao da porta *Standard*, com o “tapa-frinchas” de esponja (PS*), para a mesma frequência (Fig. 5.6).

As amostras da porta *Standard Melhorada* com a placa de 19 mm de contraplacado e com a placa de 19 mm de MDF, ambas com o “tapa-frinchas” de esponja adaptado (PSM*+CP e PSM*+MDF, respetivamente), obtiveram um índice de redução sonora de 36 dB, um valor muito aproximado aos das PSM*+Agl, PSM*+Agl+Flex e PSM*+Agl+EPDM (Quadro 5.7). Isto explica-se pelo facto de, apesar do elevado peso específico das placas de contraplacado e de MDF (respetivamente 500 e 750 kg/m^3), obteve-se apenas um aumento de 15% da massa por unidade de área, comparativamente às outras composições internas da PSM.

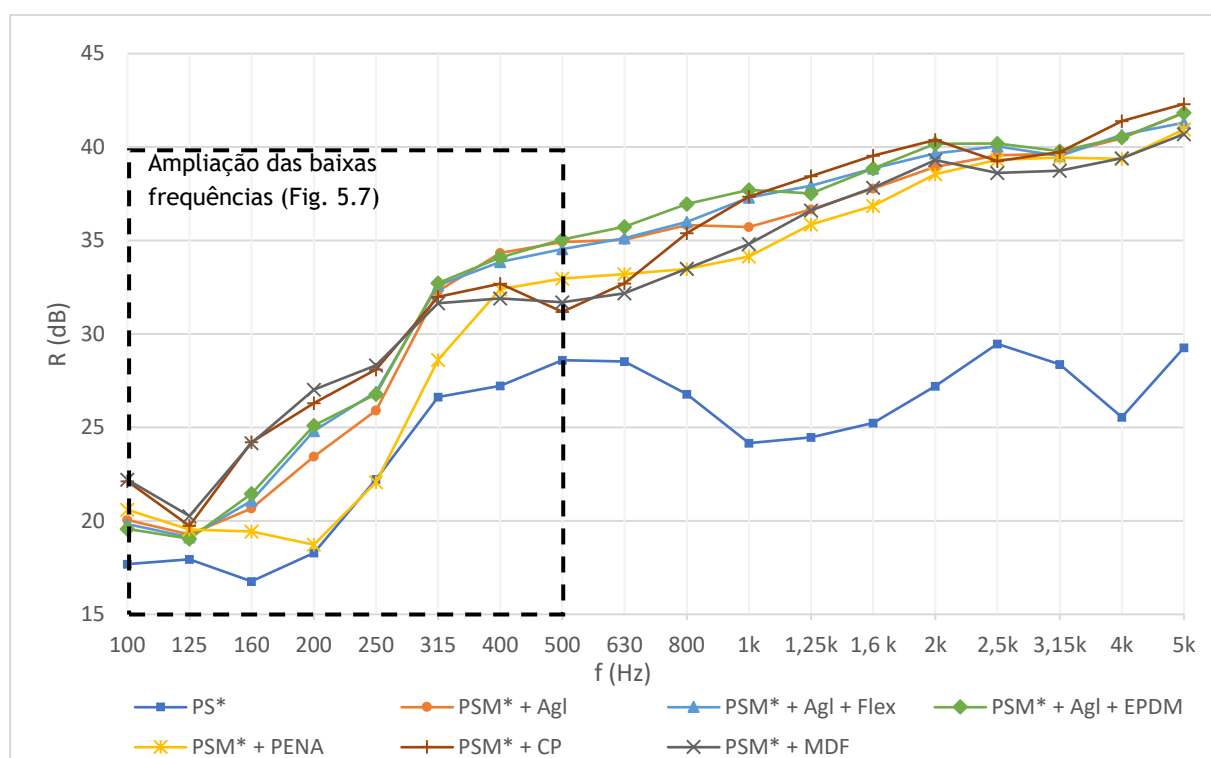
Quadro 5.7 - Valores da redução sonora R (dB), para banda de frequência (1/3 de oitava, dos 100 aos 5000 Hz); índice de redução sonora R_w (dB); termos de adaptação espectral C e C_{tr} (dB) e respetivas diferenças aritméticas, da porta *Standard* Melhorada (PSM*) com as diferentes composições internas (Quadro 4.3) e com o “tapa-frinchas” de esponja adaptado (Fig. 4.19)

Frequência (Hz, 1/3 oitava)	Redução Sonora, R (dB)						
	PS*	PSM*+Agl	PSM*+Agl+Flex	PSM*+Agl+EPDM	PSM*+PENA	PSM*+CP	PSM*+MDF
100	17,7	20,1	19,8	19,6	20,6	22,1	22,2
125	17,9	19,3	19,1	19,0	19,5	19,7	20,3
160	16,8	20,7	21,1	21,5	19,4	24,2	24,2
200	18,3	23,4	24,8	25,1	18,7	26,3	27,0
250	22,2	25,9	26,9	26,8	22,1	28,1	28,3
315	26,6	32,3	32,6	32,7	28,6	32,0	31,6
400	27,2	34,3	33,9	34,1	32,4	32,7	31,9
500	28,6	34,9	34,5	35,1	33,0	31,2	31,7
630	28,5	35,0	35,1	35,7	33,2	32,7	32,2
800	26,8	35,8	36,0	37,0	33,5	35,4	33,5
1000	24,2	35,7	37,3	37,7	34,2	37,4	34,8
1250	24,5	36,7	37,9	37,5	35,9	38,5	36,6
1600	25,2	37,8	38,8	38,9	36,9	39,5	37,8
2000	27,2	38,9	39,7	40,2	38,5	40,4	39,3
2500	29,5	39,6	40,0	40,2	39,3	39,3	38,6
3150	28,4	39,6	39,5	39,8	39,4	39,7	38,7
4000	25,5	40,5	40,7	40,5	39,4	41,4	39,4
5000	29,3	41,8	41,3	41,8	40,9	42,3	40,7
R_w (dB)	27	36	37	37	34	36	36
C (dB)	-1	-1	-2	-2	-1	-1	-2
C_{tr} (dB)	-2	-5	-5	-5	-5	-4	-4

(*) c/ o “tapa-frinchas” de esponja adaptado (Fig. 4.19) na frincha inferior da porta

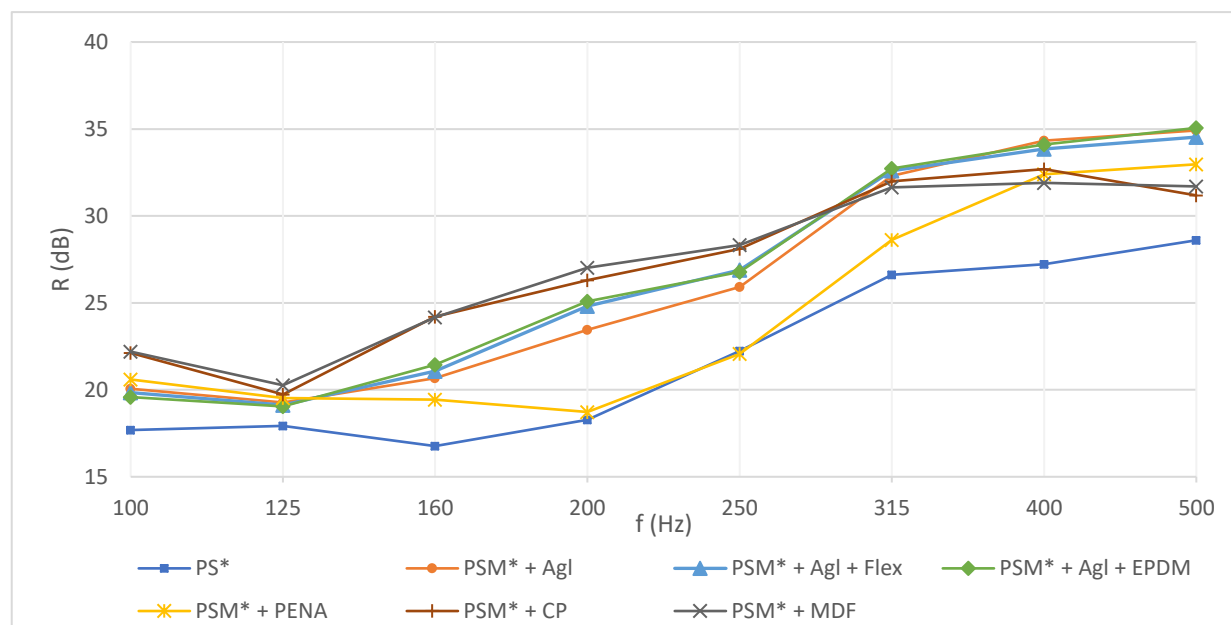
Para estas composições internas (PSM*+CP e PSM*+MDF), nas altas frequências (>2000 Hz), os valores de redução sonora mantiveram-se semelhantes aos das anteriores composições da porta *Standard* Melhorada. Contudo as PSM*+CP e PSM*+MDF apresentam os melhores resultados de redução sonora (R) para as baixas frequências (<500 Hz) o que sugere que o elevado peso específico das placas aumenta o isolamento sonoro da porta principalmente para as baixas frequências (Fig. 5.7). Curiosamente, para as bandas de frequência entre 500 e 1000 Hz, estas apresentam um decréscimo dos valores de redução sonora que pode ser explicado pelo facto da frequência crítica do contraplacado e do MDF se situar dentro desta gama de frequências (f_c entre 800 e 1000 Hz, calculado pela expressão 2.23 com os dados do quadro 2.5), o que faz com que estes materiais entrem em ressonância, logo o isolamento sonoro da porta fique comprometido.

Relativamente aos termos de adaptação espectral, o termo C , relativo à linearidade do espectro sonoro, apresenta valores entre -1 e -2 dB, pelo que se verifica que não existe grande variação do mesmo. Por outro lado, o termo C_{tr} , relativo a ruídos com grande componente energética nas baixas frequências, apresenta um valor máximo de -5 dB para a maior parte dos ensaios com a frincha inferior tapada. Isto significa que, como a colmatação da frincha inferior apenas aumentou a redução sonora das amostras nas médias e altas frequências, para ruídos com grande componente energética nas frequências baixas, como o ruído de tráfego rodoviário, o índice de redução sonora R_w destas decresce em 5 dB.



(*) c/ o “tapa-frinchas” de esponja adaptado (Fig. 4.19) na frincha inferior da porta

Figura 5.6 - Valores de redução sonora R (dB), da porta *Standard Melhorada* (PSM) com diferentes composições internas (Quadro 4.3) e da porta *Standard* (PS), ambas com “tapa-frinchas” de esponja, para cada banda de frequência (1/3 oitava, dos 100 aos 5000 Hz)



(*) c/ o “tapa-frinchas” de esponja adaptado (Fig. 4.19) na frincha inferior da porta

Figura 5.7 - Ampliação dos valores de redução sonora R (dB), da porta *Standard Melhorada* (PSM) com diferentes composições internas (Quadro 4.3) e da porta *Standard* (PS), ambas com “tapa-frinchas” de esponja, para as bandas de baixa frequência (1/3 oitava, dos 100 aos 500 Hz)

Por fim, comparando o pior, porta *Standard* sem o “tapa-frinchas” de esponja adaptado (PS), e os melhores valores de índice de redução sonora (R_w), portas *Standard* Melhoradas com a placa de *Aglomerado 120kg* e as telas (4mm) *Flexitect G+* e *EPDM 130 Negro*, ambas com o “tapa-frinchas” de esponja adaptado (PSM*+Agl+Flex e PSM*+Agl+EPDM, respetivamente), verifica-se que se obteve uma melhoria de 15 dB (de 22 para 37 dB), o que mostra que as soluções adotadas neste trabalho aumentaram consideravelmente o isolamento sonoro da porta.

No subcapítulo 3.1 apresenta-se uma pesquisa de vários catálogos de portas acústicas de outras marcas, sendo que posteriormente se procedeu a uma análise dos índices de redução sonora em função da massa por unidade de área de cada porta e respetiva aproximação logarítmica, obtendo-se a expressão 6.1. Após a obtenção dos resultados do índice de redução sonora das diferentes composições internas das portas testadas da marca TRANCAR® [3], procedeu-se a esta mesma análise, neste caso para as portas analisadas neste trabalho, obtendo-se a equação da aproximação logarítmica apresentada na expressão 6.2. A diferença entre as duas equações das aproximações logarítmicas (concorrência – TRANCAR) está apresentada na expressão 6.3.

$$R_w = 24,1 \times \log(m) + 6,13 \quad (6.1)$$

$$R_w = 44,7 \times \log(m) - 46,4 \quad (6.2)$$

$$\Delta R_{w, (concorrência-TRANCAR)} = -20,5 \times \log(m) + 52,3 \quad (6.3)$$

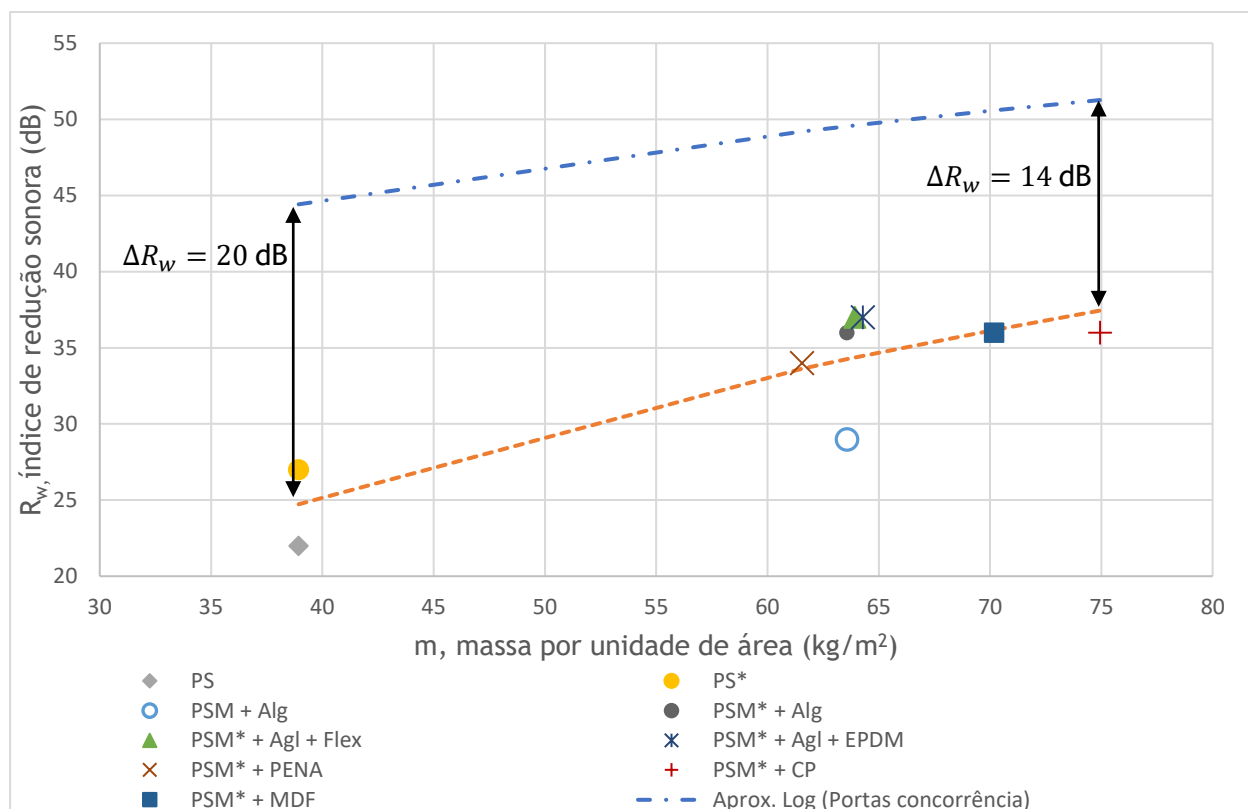
Sendo:

R_w - Índice de redução sonora ponderado, da porta (dB);

m - Massa por unidade de área, da porta (kg/m^2).

Na figura 5.8 apresenta-se os resultados do índice de redução sonora das diferentes composições internas da porta analisadas (Quadro 4.3) em função das respetivas massas por unidade de área e a aproximação logarítmica destas portas (6.2) e das portas dos fabricantes concorrentes (6.1). Nesta pode-se verificar que a eficiência acústica (índice de redução sonora em função da massa) das portas estudadas neste trabalho (portas TRANCAR®) é significativamente inferior às restantes portas dos outros fabricantes (14 a 20 dB). No entanto, estes fabricam as suas portas com a principal função de isolamento acústico e a TRANCAR® fabrica estas portas exteriores com o objetivo principal a segurança, logo a eficiência acústica destas portas não foi considerada durante a sua conceção.

Contudo, pode-se verificar que a curva de aproximação logarítmica das portas estudadas (portas TRANCAR) tem o declive mais acentuado do que a curva das portas da concorrência, obtendo-se para os menores valores de massa uma diferença no índice de redução sonora (R_w) entre as curvas de 20 dB e para os valores de massa mais elevados uma diferença de 14 dB. O que mostra que, apesar de ainda não igualar os outros fabricantes, as melhorias no isolamento sonoro obtidas neste trabalho aproximaram a TRANCAR de cumprir o objetivo de tornar as suas portas mais competitivas no mercado das portas acústicas.



(*) c/ o “tapa-frinchas” de esponja adaptado (Fig. 4.18) na frincha inferior da porta

Figura 5.8 - Valores do índice de redução sonora R_w (dB) em função da massa por unidade de área m (kg/m²) das diferentes portas avaliadas (Quadro 4.3) e respectiva aproximação logarítmica (portas TRANCAR®: $R_w = 44,7 \times \log(m) - 46,4$ e portas da concorrência: $R_w = 27,1 \times \log(m) + 6,1$ resultante da análise dos vários catálogos de portas acústicas no mercado (subcapítulo 3.1)

6.

Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

6.1. Conclusões

6.1.1. Efeito da Colmatação da Frincha Inferior - pré-amostragem

O estudo do efeito da colmatação da frincha inferior da porta teve como objetivo principal quantificar as possíveis melhorias no isolamento sonoro da porta sem alterar a sua composição interna, sabendo que *a priori* a frincha inferior poderia ser uma das causas da baixa redução sonora do elemento.

Os resultados obtidos nos ensaios não normalizados (apresentados no subcapítulo 5.2 e na figura 5.4) indicam que com a colmatação da frincha inferior da porta *Standard* se obteve uma diminuição de até 7 dB dos níveis de pressão sonora (L_p) na câmara recetora R1, principalmente para as médias frequências (entre os 500 e os 2500 Hz).

Portanto, a partir dos resultados desta avaliação, pode-se concluir que a colmatação da frincha inferior da porta pode resultar em melhorias no isolamento sonoro global, com impacto principalmente nas frequências médias-altas, sendo estas as mais audíveis para o ouvido humano. Pelo que estas melhorias serão contabilizadas, em termos de índice de redução sonora R_w , nos ensaios normalizados das diferentes composições internas de porta (subcapítulo 5.3).

No quadro 6.1 apresenta-se a soma logarítmica dos níveis de pressão sonora ($L_{p,soma}$) na câmara recetora R1, de todas as bandas de frequência (1/3 de oitava, dos 100 aos 5000 Hz) dos ensaios da porta *Standard* (PS), com e sem a frincha inferior tapada. Neste pode-se verificar que a utilização do “tapa-frinchas” de esponja adaptado (Fig. 4.19) obteve o menor $L_{p,soma}$, havendo uma diminuição de 2 dB da soma logarítmica em relação à situação sem “tapa-frinchas”. A utilização dos “tapa-frinchas” comerciais, borracha adesiva *AXTON* e rolo duplo *Tesa MOLL*, apresentados no quadro 4.5, obtiveram resultados muito semelhantes em todo o espectro de frequências (Fig. 5.4) e relativamente à soma logarítmica ($L_{p,soma}$), estes obtiveram valores muito semelhantes e uma diminuição de cerca de 1 dB comparativamente com a situação da porta *Standard* (PS) sem “tapa-frinchas”.

Concluiu-se também que a melhor solução para colmatar a frincha inferior é a utilização de um material que permita a eficaz colmatação da frincha (neste trabalho o “tapa-frinchas de esponja adaptado”), por conseguinte a utilização dos “tapa-frinchas” comerciais, como a borracha adesiva *AXTON* e rolo duplo *Tesa MOLL*, não é tão eficaz no isolamento sonoro da

porta. Como tal, para melhorar o isolamento sonoro global de uma porta, dever-se-á optar por um sistema de colmatação da frincha inferior que possibilite a total estanqueidade da frincha aplicado durante a construção da porta (solução “preventiva”), em vez de adotar uma solução remediativa, como os “tapa-frinchas” comerciais.

Quadro 6.1 - Efeito da colmatação da frincha inferior da porta *Standard* (PS) - valores síntese ($L_{p,soma}$ (dB), soma logarítmica do nível de pressão sonora, na câmara recetora R1, de todas as bandas de frequência 1/3 oitava), e diferenças aritméticas relativas à situação sem “tapa-frinchas” (PS s/ “tapa-frinchas”)

Configuração da frincha inferior	PS s/ “tapa-frinchas”	PS c/ “tapa-frinchas” de esponja	PS c/ “tapa-frinchas” AXT	PS c/ “tapa-frinchas” MOLL
$L_{p,soma}$ (dB, soma logarítmica)	69,8	67,8	68,7	68,8
ΔL (dB, diferença aritmética relativa à PS s/ “tapa-frinchas”)	-	2,0	1,1	1,0

6.1.2. Efeito das Diferentes Composições Internas da Porta *Standard* Melhorada (PSM)

A aplicação de diferentes materiais na composição interna da porta *Standard* Melhorada (apresentados no quadro 4.3) teve como objetivo aumentar a redução sonora a ruídos de condução aérea. Os resultados obtidos pelos ensaios normalizados da redução sonora R em função da frequência, índice de redução sonora R_w e respetivos termos de adaptação espectral C e C_{tr} (dB), de cada composição (amostra) (apresentados no subcapítulo 5.3) indicam de forma geral que as amostras com maior massa superficial obtiveram melhores valores de redução sonora.

Em primeiro lugar, comparando os valores de redução sonora da porta *Standard* (PS) com e sem o “tapa-frinchas” adaptado (Quadro 6.2), verifica-se, tal como esperado após a avaliação do efeito da colmatação frincha inferior (pré-amostragem), uma melhoria significativa do índice de redução sonora R_w em 5 dB (de 22 para 27 dB), aquando a inserção do “tapa-frinchas” adaptado na frincha inferior.

Relativamente à porta *Standard* Melhorada com a placa de *Aglomerado 120kg* (PSM+Agl), com e sem a frincha inferior colmatada pelo mesmo “tapa-frinchas” adaptado (Quadro 6.2), verifica-se também uma maior melhoria no índice de redução sonora R_w em 7 dB (de 29 para 36 dB). A partir destes resultados, conclui-se que a frincha inferior de ambas as portas tem grande influência no isolamento sonoro da porta e que sua eficaz colmatação é um parâmetro de grande importância para se obter um bom comportamento acústico da porta.

Em relação aos valores de redução sonora R (dB) em função da frequência (apresentados na figura 5.5) verifica-se que, para ambas as portas (PS e PSM+Agl), as melhorias no isolamento sonoro provocadas pela colmatação da frincha inferior são sentidas principalmente para as frequências médias e altas (>500 Hz). A PS com e sem o “tapa-frinchas” se obteve um máximo de melhoria na redução sonora em cerca de 7 dB, para as bandas de frequência entre e 1000 e 1600 Hz. Por sua vez a PSM, também com e sem o “tapa-frinchas”, obteve-se um máximo de melhoria na redução sonora R em cerca de 11 dB, para as bandas de frequência entre 1600 a

4000 Hz. Sendo estas as frequências mais sensíveis para o ouvido humano, conclui-se mais uma vez, que a colmatação da frincha inferior tem grande impacto na melhoria no isolamento sonoro, a ruídos de condução aérea, da porta.

Comparando agora os valores do índice de redução sonora (R_w) da porta *Standard* (PS) e da porta *Standard* Melhorada com placa de aglomerado (PSM+Agl), ambas sem o “tapa-frinchas” de esponja (Quadro 6.2), verifica-se um aumento de 7 dB (22 para 29 dB). Pela *Lei da Massa* (definida pelo aumento de 6 dB na redução sonora quando a massa do elemento duplica) pode-se concluir que a causa principal para esta melhoria no isolamento sonoro pode ser a diferença de massa entre as portas, ou seja, o aumento em cerca de 1.6x da massa superficial da PSM+Agl (66,3 kg/m²), relativamente à PS (38,9 kg/m²), faz aumentar significativamente o seu isolamento sonoro. Porém existem também outros fatores que influenciaram positivamente a melhoria no isolamento da PSM+Agl, dos quais (mencionados no subcapítulo 5.3) a instalação de um sistema de colmatação da frincha inferior embutido de soleira móvel dupla em vez da soleira móvel simples instalada na porta *Standard* e a não existência de visor.

A conjugação do aumento da massa superficial da porta com a colmatação eficaz da frincha inferior obteve uma melhoria de 14 dB no índice de redução sonora R_w (de 22 dB da PS para 36 dB da PSM+Agl). Portanto pode-se concluir que, para se obter o melhor resultado de índice de redução sonora possível, dever-se-á aumentar, não só a massa da porta, mas também instalar um sistema de colmatação da frincha inferior que permita a sua total estanqueidade.

Quadro 6.2 - Avaliação do efeito da frincha inferior - valores síntese (índice de redução sonora R_w , diferenças aritméticas entre os índices de redução sonora ΔR_w e termos de adaptação espectral C e C_{tr}) dos ensaios normalizados, e valores das massas superficiais, da porta *Standard* (PS) e da porta *Standard* Melhorada com a placa de *Aglomerado 120kg* (PSM+Agl)

	PS	PS*	PSM+Agl	PSM*+Agl
R_w (dB)	22	27	29	36
ΔR_w (dB)	5		7	
	14			
C (dB)	-1	-1	-1	-1
C_{tr} (dB)	-2	-2	-1	-5
m (kg/m ²)	38,9		63,6	

(*) c/ o “tapa-frinchas” de esponja adaptado (Fig. 4.19) na frincha inferior da porta

No quadro 6.3 estão apresentados, por ordem crescente, os valores do índice de redução sonora R_w , diferença aritméticas ΔR_w , termos de adaptação espectral C e C_{tr} e o valor da massa por unidade de área de cada configuração da estrutura interna (Quadro 4.3) da PSM. Pode-se verificar que os melhores resultados do índice de redução sonora ($R_w = 37$ dB) foram obtidos para a porta *Standard* Melhorada com a placa de *Aglomerado 120kg* [9] (20 mm) e a tela *Flexitect G+* [10] (4 mm) e para a mesma porta com a placa de aglomerado e a tela *EDPM 130 Negro* (4 mm) [11], ambas com a frincha inferior tapada com o “tapa-frinchas” de esponja adaptado (PSM+Agl+Flex e PSM+Agl+EDPM, respetivamente). Por outro lado, verifica-se também, tal como supracitado, a porta *Standard* sem o “tapa-frinchas” (PS*) apresenta o pior resultado de índice de redução sonora ($R_w = 22$ dB).

Em relação aos restantes resultados para a porta *Standard* Melhorada, com o “tapa-frinchas” e com as diferentes composições internas (PSM*+PENA, PSM*+Alg+Flex, PSM*+Agl+EDPM, PSM*+CP

e PSM*+MDF), verifica-se que não se obteve uma melhoria significativa (no máximo de 3 dB entre elas) devido à diferença de massa ser pouco significativa (cerca de 15%).

Nos valores de redução sonora R (Fig. 5.6) verifica-se que para as altas frequências (>2000 Hz) as diferentes composições internas da PSM têm um comportamento muito semelhante.

Para as baixas frequências (<500 Hz), por outro lado, verifica-se que existem diferenças na redução sonora R entre as diferentes composições internas (Fig. 5.7). Estas diferenças podem ser explicadas pelos diferentes pesos específicos das placas/telas inseridas na porta *Standard Melhorada*, ou seja, a porta com a placa de 20 mm de PENA 30 FR [54] (PSM*+PENA), tendo a placa um peso específico de apenas 33 kg/m³, obteve os piores valores de redução sonora. Já as portas com a placa de MDF e de contraplacado (PSM*+MDF e PSM*+CP), tendo as placas os pesos específicos mais elevados (respetivamente 750 e 500 kg/m³), para as baixas frequências, obtiveram os melhores valores de redução sonora. Como tal é possível concluir que, para as baixas frequências, é possível melhorar o isolamento sonoro da porta aumentando o peso específico dos seus materiais constituintes.

Todavia, para as bandas de frequência entre 500 e 1000 Hz, existe um decréscimo abrupto da redução sonora das portas *Standard Melhoradas* com a placa de 19 mm de contraplacado (PSM*+CP) e com a placa de 19 mm de MDF (PSM*+MDF), devido à frequência crítica destes materiais se situar nesta gama de frequências (f_c entre 800 e 1000 Hz, calculado pela expressão 2.23 com os dados do quadro 2.5). Como tal, dever-se-ia aumentar a espessura destas placas, para cerca de 20 cm, de forma a garantir que a diminuição da frequência crítica para valores mais baixos e menos sensíveis ao ouvido humano (<100 Hz), sendo para isso necessário aumentar a espessura da porta.

Portanto, tendo em consideração todos os aspetos supracitados, com vista a melhorar o isolamento sonoro a ruídos de condução aérea das portas exterior da marca TRANCAR® [3], dentro das hipóteses testadas, as soluções mais vantajosas são a porta *Standard Melhorada* com placa de 20 mm de *Aglomerado 120 kg* e a tela de 4 mm *Flexitect G+* (PSM*+Agl+Flex) e a porta *Standard Melhorada* com a mesma placa de aglomerado e a com a tela de 4 mm de borracha EPDM 130 Negro (PSM*+Agl+EPDM).

Quadro 6.3 - Efeito das diferentes Valores síntese composições internas (apresentadas no quadro 4.3) da porta *Standard Melhorada* (PSM) - valores síntese (índice de redução sonora R_w , diferenças aritméticas entre os índices de redução sonora ΔR_w relativas à PS* e termos de adaptação espectral C e C_{tr}) dos ensaios normalizados e valores das respetivas massas superficiais m

	PS*	PSM*+PENA	PSM*+Alg	PSM*+CP	PSM*+MDF	PSM*+Agl+Flex	PSM*+Agl+EDPM
R_w (dB)	27	34	36	36	36	37	37
C (dB)	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-2
C_{tr} (dB)	-2	-5	-5	-4	-4	-5	-5
m (kg/m ²)	38,9	61,6	63,6	70,2	74,9	63,9	64,3

(*) c/ o “tapa-frinchas” de esponja adaptado (Fig. 4.19) na frincha inferior da porta

Em suma, pode-se concluir que:

- a frincha inferior da porta é um dos pontos mais fracos no isolamento sonoro, a ruídos de condução aérea, portanto a sua eficaz colmatação é muito importante para garantir melhorias significativas no isolamento sonoro (obtendo-se melhorias máximas de 7 dB);
- a instalação de “tapa-frinchas” durante a fase de construção da porta, tal como sistemas embutidos (solução preventiva) é mais eficaz do que a aplicação de “tapa-frinchas” comerciais após a instalação da porta (solução remediativa);
- comparando os resultados da porta *Standard* (PS) e da porta *Standard Melhorada* com a placa *Aglomerado 120kg* (PSM+Agl), a quase duplicação da massa da porta aumenta o índice de redução sonora R_w da porta em pelo menos 6 dB. Contudo, aumentos de massa da porta não significativos (< 40%) não originam aumentos significativos do isolamento;
- além do aumento da massa da porta, é importante um pequeno aumento da espessura dos seus materiais constituintes de forma a que, de forma a que as frequências críticas se situem na região das baixas frequências e, como tal, não originem falhas no isolamento sonoro da porta em frequências mais sensíveis ao ouvido humano.

6.2. Propostas de Futuros Desenvolvimentos

Este trabalho propõe algumas soluções de melhoria no isolamento sonoro, a ruídos de condução aérea, de portas exteriores de segurança da marca TRANCAR® [3], contudo, comparando com as portas acústicas de outras marcas (subcapítulo 3.1), existe ainda grande margem para posteriores melhorias, como demonstra a figura 5.8 onde se verifica que, para mesma massa por unidade de área, o isolamento sonoro das portas da TRANCAR situa-se entre 14 a 20 dB abaixo das portas das outras marcas. Como tal existe a ainda a possibilidade de desenvolvimentos futuros de outras soluções de melhorias no isolamento sonoro e de diferentes metodologias de caracterização do comportamento acústico da porta. Por este motivo, de seguida, enumera-se algumas destas possibilidades.

A metodologia, adotada neste trabalho, de mudança da composição interna da porta, ou seja, a inserção das diferentes placas/telas obrigou a remoção, por pessoal não qualificado, do painel interior, da fechadura e do manípulo da porta, como tal o isolamento sonoro poderá ter sido comprometido. Portanto, a remoção destes componentes da porta por pessoal qualificado reduziria esse risco de comprometimento do isolamento sonora da porta.

Neste trabalho, por questões de tempo, e por se terem utilizado apenas cinco materiais distintos, com espessuras limitadas (com 20 mm as placas de *Aglomerado 120kg* e de *PENA 30 FR*, com 19 mm as placas de contraplacado e de MDF, e com 4 mm as telas *Flexitect G+* e *EDPM 130 Negro*), foi só possível o teste de seis composições diferentes da porta *Standard Melhorada* (PSM). Por isso, seria necessário, no futuro a continuação do estudo de melhorias no isolamento destas portas com a utilização de diferentes materiais e com maior variedade de espessuras, de forma a se obterem melhores resultados no isolamento sonoro.

Uma outra possibilidade de melhoria no isolamento sonoro seria alteração estrutural da porta, que tal como sugerido pelo autor para a porta *Standard Melhorada* (Fig. 4.13), encurtar ainda

mais as estruturas de reforço metálicas, de forma a possibilitar a aplicação de mais placas/telas ou de placas com maior espessura entre a estrutura metálica e o painel exterior.

Uma das principais conclusões retiradas deste trabalho foi a importância da eficaz colmatação da frincha inferior, como tal, seria interessante o estudo do comportamento acústico de diversos sistemas de colmatação da frincha inferior embutidos na porta.

Além do estudo experimental, seria vantajoso a utilização dos modelos teóricos, mencionados no subcapítulo 3.2 (Sharps, Cummings e Mulholland, Gomperts e Jones), para estimar possíveis melhorias, tanto estruturais como aplicadas às frinchas periféricas, para assim testar em laboratório os resultados mais favoráveis teoricamente, desta forma poupando tempo e recursos preciosos.

Referências Bibliográficas

- [1] Reinten, J. *et al.*; *The indoor sound environment and human task performance: A literature review on the role of room acoustics*. Building and Environment; 2017. **123**: p. 315-332.
- [2] Shimizu, T., Y. Kawai e D. Takahashi; *Numerical analyses and experimental evaluation of reduction technique for sound transmission through gaps*. Applied Acoustics; 2015. **99**: p. 97-109.
- [3] Ayeme/Trancar; URL: <http://www.ayeme.com/index.php?id=121>; acedido em 30.04.2018.
- [4] EN ISO 10140-4; 2010; Switzerland; Acoustics - Laboratory measurements of sound insulation of building elements - Part 4: Measurements procedures and requirements.
- [5] EN ISO 10140-2; 2010; Switzerland Acoustics - Laboratory measurements of sound insulation of building elements - Part 2: Measurement of airborne sound insulation.
- [6] EN ISO 10140-5; 2010; Switzerland; Acoustics - Laboratory measurements of sound insulation of building elements - Part 5: Requirement for test facilities and equipment
- [7] EN ISO 10140-1; 2010; Switzerland; Acoustics - Laboratory measurements of sound insulation of building elements - Part 1: Application rules for specific products.
- [8] Qualidade, I. P. d.; *NP EN ISO 717-1 2009*; Portugal; Determinação do Isolamento Sonoro em Edifícios e de Elementos de Construção - Parte 1: Isolamento sonoro a ruídos de condução aérea.
- [9] Flexicel; *Ficha Técnica - Aglomerado 120 Kg*; Flexicel Portugal Unipessoal, Lda; 2011.
- [10] Flexicel; *Ficha Técnica - Flexitect G+*; Flexicel Portugal Unipessoal, Lda; 2017.
- [11] Flexicel; *Ficha Técnica - EPDM 130 Negro*; Flexicel Portugal Unipessoal, Lda; 2017.
- [12] Hassan, O. A. B.; *Building Acoustics and Vibration: Theory and Practice*. 2009, London, U.K.: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- [13] Long, M., 1 - *Historical Introduction*, em *Architectural Acoustics (Second Edition)*. 2014, Academic Press: Boston. p. 1-38.
- [14] Carvalho, A. P. O.; *Acústica Ambiental e de Edifícios*. 8.12 ed. 2016, FEUP.
- [15] Sarradj, E.; *Apontamentos da disciplina: Acústica Técnica I (Technique Akustik I)*. 2017: Technische Universität Berlin.
- [16] Cunha, N. C. M.; *Isolamento Sonoro em Salas de Aula, O Caso Prático do Efeito de Colmatação de Frinças em Portas*; 2014; Mestrado Integrado em Engenharia Civil; Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [17] Sarradj, E.; *Apontamentos da disciplina: Redução de Ruído de Máquinas e Veículos (Lärmminderung an Maschinen und Fahrzeugen)* 2017: Technische Universität Berlin.
- [18] Velocidade de Propagação do Som; URL: <http://slideplayer.com/slide/4492051/>; acedido em 23/02/2018.
- [19] Glossário de Acústica; URL: <http://www.acoustic-glossary.co.uk/sound-fields.htm>; acedido em 16.04.2018.
- [20] Pressão Sonora; URL: https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Sound_pressure_diagram.svg; acedido em 23/02/2018.
- [21] Frequência Sonora; URL: https://anasoares1.files.wordpress.com/2011/01/som_freq1.png; acedido em 27.02.2018.
- [22] Difusão de Ondas Sonoras; URL: https://ctborracha.com/?page_id=1667; acedido em 28.02.108.
- [23] Difração Sonora; URL: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Sound/diffrac.html>; acedido em 28.02.2018.
- [24] Difração sonoras por Aberturas; URL: <https://www.ck12.org/physics/wave-interactions/lesson/Wave-Interactions-MS-PS/>; acedido em 28.02.2018.
- [25] Sequeira, S. M. F. G.; *Proposta de Catálogo de Soluções de Reabilitação Acústica à Base de Painéis Compósitos de Madeira e Cimento*; 2016; Mestrado Integrado em Engenharia Civil; Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [26] Onda Estacionária; URL: <https://physics.stackexchange.com/questions/268454/what-is-a-standing-wave/268457#268457>; acedido em 17.04.2018.
- [27] AMBICO; *Acoustic Wood Doors & Steel Frame Assemblies*; AMBICO: Specialized Doors-Frames-Windows; 2017.
- [28] Overly; *Sound-Retardant Products - A complete line of Architectural Acoustic Door and Fixed Window Systems*; Overly - Door Company; 2017.
- [29] Lidner; *Lidner Acoustic Solutions Catalog*; Lidner Group; 2016.

- [30] Krieger - Sonic Pre-engineered Models; URL: <https://www.kriegerproducts.com/acoustical/models/>; acessado em 09.03.2018.
- [31] *Silêncio; Catálogo Portas Acústicas - Gama SILENTIUM*; 2006.
- [32] What is ASTM E-90 and what you need to know about it; URL: <https://www.kriegerproducts.com/pressreleases/what-is-astm-e-90-and-what-you-need-to-know-about-it/>; acessado em 18.03.2018.
- [33] Qualidade, I. P. d.; *EN ISO 717-1*; 2009; Determinação do Isolamento Sonoro e de Elementos de Construção - Parte I: Isolamento sonoro a ruídos de condução aérea.
- [34] Qurt, D. et al.; *Guide to Calculating Airbourne Sound Transmission in Buildings*. 2013; National Research Council Canada.
- [35] *AMBICO; Desenho Técnico - Porta Acústica de Aço 57-59 dB*; 2016.
- [36] *Overly - Door Company*; Desenhos Técnicos Porta Tandem Modelo 5792190; URL: <http://door.overly.com/product/drawings/5792190>; acessado em 12.03.2018.
- [37] *Overly - Door Company*; Porta metálica Tandem, modelo 5792190 URL: <http://door.overly.com/product/5792190>; acessado em 12.03.2018.
- [38] Giacomini, E.; *Material, O Vidro*; Departamento de Engenharia Cível; Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [39] Asdrubali, F. et al.; *Experimental and numerical characterization of innovative cardboard based panels: Thermal and acoustic performance analysis and life cycle assessment*. Building and Environment; 2016. **95**: p. 145-159.
- [40] Kurra, S.; *Comparison of the models predicting sound insulation values of multilayered building elements*. Applied Acoustics; 2012. **73**(6): p. 575-589.
- [41] Neubauer, R. O. e J. Kang; *Airborne sound insulation in terms of a loudness model*. Applied Acoustics; 2014. **85**: p. 34-45.
- [42] Hongisto, V.; *SOUND INSULATION OF DOORS—PART 1: PREDICTION MODELS FOR STRUCTURAL AND LEAK TRANSMISSION*. Journal of Sound and Vibration; 2000. **230**(1): p. 133-148.
- [43] Hongisto, V., J. Keränen e M. Lindgren; *SOUND INSULATION OF DOORS—PART 2: COMPARISON BETWEEN MEASUREMENT RESULTS AND PREDICTIONS*. Journal of Sound and Vibration; 2000. **230**(1): p. 149-170.
- [44] *Decreto-Lei 96/2008 - Regulamento dos Requisitos Acústicos de Edifícios (RRAE)*; 2008.
- [45] Requisitos Acústicos - Áustria URL: https://shop.austrian-standards.at/action/de/public/details/153224/OENORM_B_8115-4_2003_09_01; acessado em 06.03.2018.
- [46] Austrian Standards, ÖNORM B 8115-2: Schallschutz und Raumakustik im Hochbau - Teil 2: Anforderungen an den Schallschutz; URL: https://shop.austrian-standards.at/action/de/public/details/101132/OENORM_B_8115-2_2002_09_01; acessado em 19.03.2018.
- [47] *Bautechnische Versuchs- und Forschungsanstalt Salzburg*; Neue Normen und Regelwerke im Bauwesen (Novas Normas e Regras em Edifícios) - ÖNORM B 8115 - Serie: Schallschutz und Raumakustik im Hochbau (Isolamento Sonora a Ruídos Aéreos em Edifícios); Salzburg; 2003.
- [48] *Ministère de l'Écologie et du Développement Durable (Ministério do Ambiente e do Desenvolvimento Sustentável)*; Arrêté du 25 avril 2003 (Ordem de 23 de Abril 2003); França; 2003.
- [49] *Federale Overheidsdienst Economie, K.M.O., Middenstand en Energie*; NBN S 01-400-2, Akoestische criteria voor schoolgebouwen (Critérios acústicos para edifícios escolares); Holanda; 2012.
- [50] Valores do isolamento sonoro, Holanda; URL: <http://docplayer.nl/15336314-De-nieuwe-akoestische-norm-voor-schoolgebouwen.html>; acessado em 08.03.2018.
- [51] Kjaer, B.; *IDAe Hardware Configurations for PULSE - Types 3560-B, 3560-C, 3560-D and 3560-E*; 2008.
- [52] Termo Higrómetro URL: <https://www.testo.com/pt-PT/testo-435-2/p/0563-4352>; acessado em 21.04.2018.
- [53] *TRANCAR; Portas de Segurança - Catálogo*; Augusto Moreira, Lda; 2015.
- [54] *Flexicel; Ficha Técnica - PENA 30 FR (20 mm)*; Flexicel Portugal Unipessoal, Lda; 2015.
- [55] Qualidade, I. P. d.; *NP EN ISO 3382-2 2011*; Portugal Medição de Parâmetros de Acústica de Salas - Parte 2: Tempo de Reverberação em salas correntes.

Anexo

Resultados detalhados da avaliação do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea das sete configurações da estrutura da porta (amostragem): média logarítmica dos valores nível de pressão sonora na câmara emissora E1 (L_E , dB), na câmara recetora R1 (L_R , dB) e respetivo ruído de fundo (L_r , dB); redução sonora das transmissões marginais pela parede de gesso cartonado entre as câmaras reverberantes (R_{marg} , dB), do conjunto parede de fecho e porta em estudo (R_{conj} , dB) e respetiva redução sonora corrigida (R , dB); curva de referência apresentada na NP EN ISO 717-1 [8]; índice de redução sonora (R_w , dB) e respetivos termos de adaptação espectral (C e C_{tr} , dB).

- Porta *Standard* (PS), sem “tapa-frinchas” de esponja adaptado (Fig. 4.18)

Quadro A.1 - Resultados detalhados da porta *Standard* (PS), sem o “tapa-frinchas” de esponja adaptado, para cálculo da redução sonora em função da banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz), do índice de redução sonora R_w e respetivos termos de adaptação espectral C e C_{tr}

Frequência (Hz, 1/3 oitava)	L_E (dB)	L_r (dB)	L_R (dB)	R_{conj} (dB)	R_{marg} (dB)	R (dB)	Curva de referência	Dif.	R_w (dB)	C (dB)	C_{tr} (dB)
100	82,7	11,8	59,3	16,9	42,2	17,0	3	negativo	22	-1	-2
125	81,8	9,2	56,9	17,0	50,7	17,0	6	negativo			
160	79,8	6,7	55,9	16,3	49,1	16,3	9	negativo			
200	83,3	5,7	57,2	18,0	57,1	18,0	12	negativo			
250	84,2	6,5	53,1	21,1	59,8	21,1	15	negativo			
315	87,1	6,6	51,6	24,2	65,4	24,2	18	negativo			
400	86,9	6,1	50,7	25,0	72,1	25,0	21	negativo			
500	85,7	6,9	47,9	25,4	76,8	25,4	22	negativo			
630	86,8	7,3	48,5	23,5	81,8	23,5	23	negativo			
800	85,2	7,9	48,3	21,0	80,2	21,0	24	3,0			
1000	82,8	8,4	48,2	17,6	76,4	17,6	25	7,4			
1250	81,1	8,9	45,7	17,6	73,6	17,6	26	8,4			
1600	84,1	9,6	47,7	18,7	75,7	18,7	26	7,3			
2000	87,2	10,1	48,5	22,6	77,1	22,6	26	3,4			
2500	87,9	10,9	46,5	26,1	76,4	26,1	26	negativo			
3150	86,3	10,9	45,7	27,0	75,2	27,0	26	negativo			
4000	84,1	10,9	46,1	25,2	71,9	25,2	-	-			
5000	84,5	11,2	42,7	28,5	71,8	28,5	-	-			
Total	97,6	21,6	65,2	-	-	-	-	29,4	-	-	-

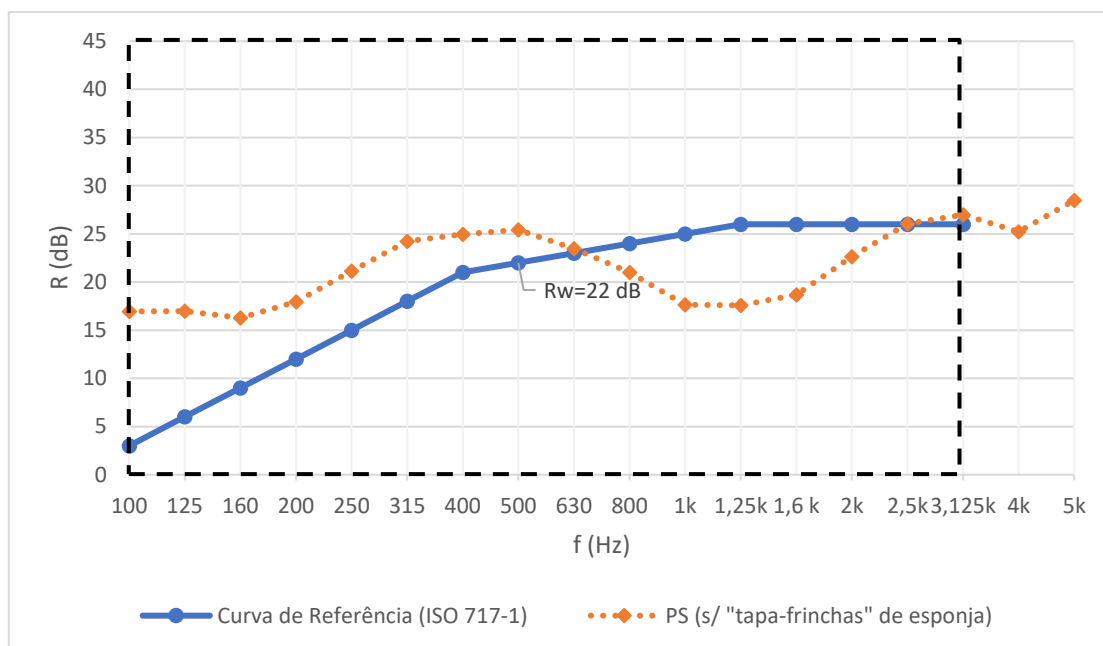


Figura A.1 - Resultados da redução sonora da porta *Standard* (PS), sem o “tapa-frinchas” de esponja, para cada banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz) e curva de referência adotada da NP EN ISO 717-1 [8]

- Porta *Standard* (PS*), com “tapa-frinchas” de esponja adaptado (Fig. 4.18)

Quadro A.2 - Resultados detalhados da porta *Standard* (PS*), com o “tapa-frinchas”, para cálculo da redução sonora em função da banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz), do índice de redução sonora R_w e respetivos termos de adaptação espectral C e C_{tr}

Frequência (Hz, 1/3 oitava)	L_E (dB)	L_r (dB)	L_R (dB)	R_{conj} (dB)	R_{marg} (dB)	R (dB)	Curva de referência	Dif.	R_w (dB)	C (dB)	C_{tr} (dB)
100	82,7	11,8	59,3	17,7	42,2	17,7	9	negativo	27	-1	-2
125	81,8	9,2	56,9	17,9	50,7	17,9	11	negativo			
160	79,8	6,7	55,9	16,8	49,1	16,8	14	negativo			
200	83,3	5,7	57,2	18,3	57,1	18,3	17	negativo			
250	84,2	6,5	53,1	22,2	59,8	22,2	20	negativo			
315	87,1	6,6	51,6	26,6	65,4	26,6	23	negativo			
400	86,9	6,1	50,7	27,2	72,1	27,2	26	negativo			
500	85,7	6,9	47,9	28,6	76,8	28,6	27	negativo			
630	86,8	7,3	48,5	28,5	81,8	28,5	28	negativo			
800	85,2	7,9	48,3	26,8	80,2	26,8	29	2,2			
1000	82,8	8,4	48,2	24,2	76,4	24,2	30	5,8			
1250	81,1	8,9	45,7	24,5	73,6	24,5	31	6,5			
1600	84,1	9,6	47,7	25,2	75,7	25,2	31	5,8			
2000	87,2	10,1	48,5	27,2	77,1	27,2	31	3,8			
2500	87,9	10,9	46,5	29,5	76,4	29,5	31	1,5			
3150	86,3	10,9	45,7	28,4	75,2	28,4	31	2,6			
4000	84,1	10,9	46,1	25,5	71,9	25,5	-	-			
5000	84,5	11,2	42,7	29,3	71,8	29,3	-	-			
Total	97,6	21,6	65,2	-	-	-	-	28,3	-	-	-

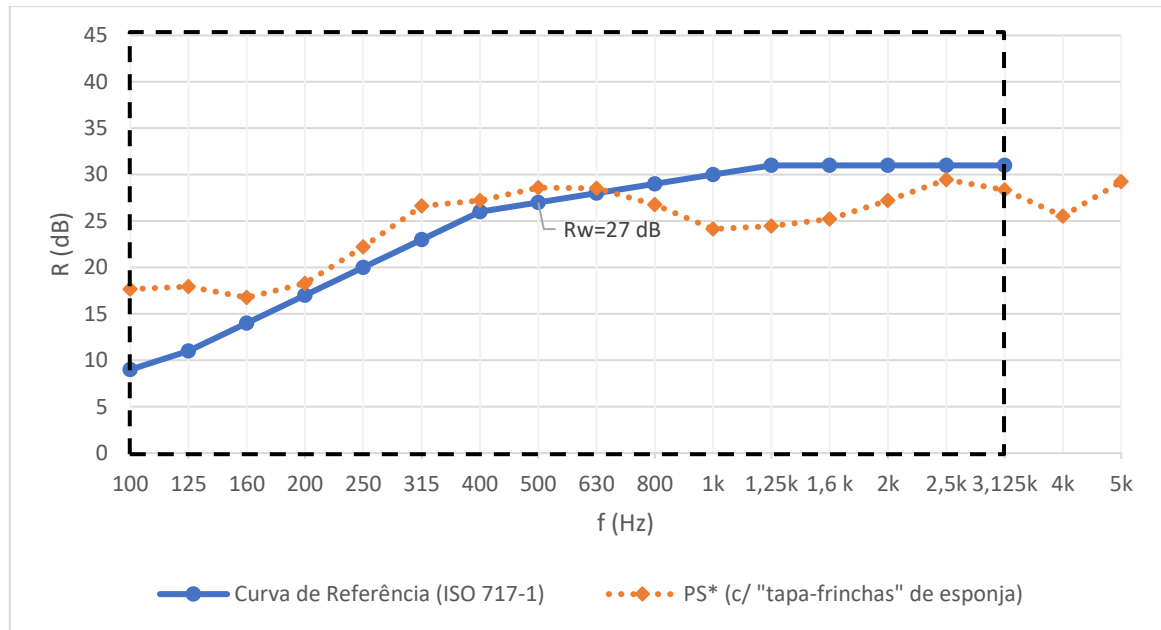


Figura A.2 - Resultados da redução sonora da porta *Standard* (PS*), com o “tapa-frinchas” de esponja, para cada banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz) e curva de referência adotada da NP EN ISO 717-1 [8]

- Porta *Standard* Melhorada com placa de 20 mm de *Aglomerado 120 KG* (PSM + Agl) sem o “tapa-frinchas” de esponja (Fig. 4.18)

Quadro A.3 - Resultados detalhados da PSM + Agl, sem o “tapa-frinchas”, para cálculo da redução sonora em função da banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz), do índice de redução sonora R_w e respetivos termos de adaptação espectral C e C_{tr}

Frequência (Hz, 1/3 oitava)	L_E (dB)	L_r (dB)	L_R (dB)	R_{conj} (dB)	R_{marg} (dB)	R (dB)	Curva de referência	Dif.	R_w (dB)	C (dB)	C_{tr} (dB)
100	82,7	11,8	57,1	19,9	42,2	19,9	10	negativo	29	-1	-1
125	81,8	9,2	55,8	19,1	50,7	19,1	13	negativo			
160	79,8	6,7	52,1	20,6	49,1	20,6	16	negativo			
200	83,3	5,7	51,9	23,6	57,1	23,6	19	negativo			
250	84,2	6,5	49,7	25,6	59,8	25,6	22	negativo			
315	87,1	6,6	46,7	31,5	65,4	31,5	25	negativo			
400	86,9	6,1	44,7	33,2	72,1	33,2	28	negativo			
500	85,7	6,9	43,8	32,7	76,8	32,7	29	negativo			
630	86,8	7,3	45,0	32,0	81,8	32,0	30	negativo			
800	85,2	7,9	43,3	31,8	80,2	31,8	31	negativo			
1000	82,8	8,4	42,6	29,7	76,4	29,7	32	2,3			
1250	81,1	8,9	42,7	27,5	73,6	27,5	33	5,5			
1600	84,1	9,6	46,5	26,5	75,7	26,5	33	6,5			
2000	87,2	10,1	47,7	28,0	77,1	28,0	33	5,0			
2500	87,9	10,9	47,3	28,7	76,4	28,7	33	4,3			
3150	86,3	10,9	45,0	29,1	75,2	29,1	33	3,9			
4000	84,1	10,9	41,8	29,9	71,9	29,9	-	-			
5000	84,5	11,2	39,1	32,8	71,8	32,9	-	-			
Total	97,6	21,6	62,3	-	-	-	-	27,5	-	-	-

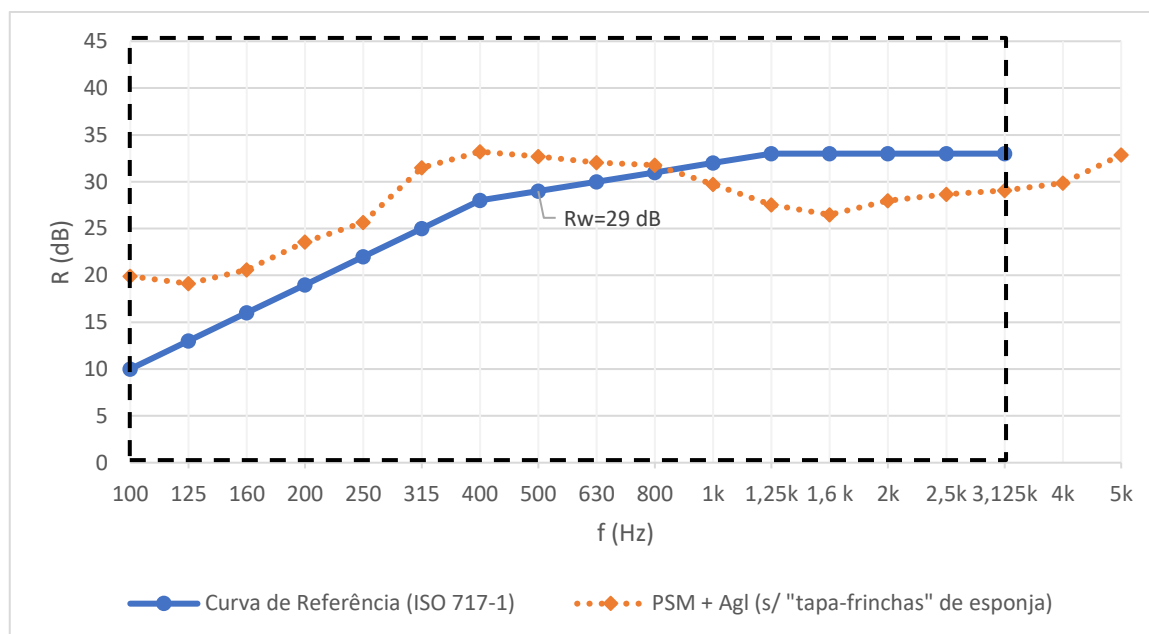


Figura A.3 - Resultados da redução sonora da PSM + Agl, sem o "tapa-frinchas" de esponja, para cada banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz) e curva de referência adotada da NP EN ISO 717-1 [8]

- Porta *Standard* Melhorada com placa de 20 mm de *Aglomerado 120 KG* (PSM* + Agl) com o "tapa-frinchas" de esponja (Fig. 4.18)

Quadro A.4 - Resultados detalhados da PSM* + Agl, com o "tapa-frinchas", para cálculo da redução sonora em função da banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz), do índice de redução sonora R_w e respetivos termos de adaptação espectral C e C_{tr}

Frequência (Hz, 1/3 oitava)	L_E (dB)	L_r (dB)	L_R (dB)	R_{conj} (dB)	R_{marg} (dB)	R (dB)	Curva de referência	Dif.	R_w (dB)	C (dB)	C_{tr} (dB)
100	82,7	11,8	57,0	20,0	42,2	20,1	17	negativo	36	-1	-5
125	81,8	9,2	55,6	19,3	50,7	19,3	20	0,7			
160	79,8	6,7	52,0	20,7	49,1	20,7	23	2,3			
200	83,3	5,7	52,0	23,4	57,1	23,4	26	2,6			
250	84,2	6,5	49,5	25,9	59,8	25,9	29	3,1			
315	87,1	6,6	45,9	32,3	65,4	32,3	32	negativo			
400	86,9	6,1	43,6	34,3	72,1	34,3	35	0,7			
500	85,7	6,9	41,6	34,9	76,8	34,9	36	1,1			
630	86,8	7,3	42,0	35,0	81,8	35,0	37	2,0			
800	85,2	7,9	39,2	35,8	80,2	35,8	38	2,2			
1000	82,8	8,4	36,6	35,7	76,4	35,7	39	3,3			
1250	81,1	8,9	33,5	36,7	73,6	36,7	40	3,3			
1600	84,1	9,6	35,2	37,8	75,7	37,8	40	2,2			
2000	87,2	10,1	36,8	38,9	77,1	38,9	40	1,1			
2500	87,9	10,9	36,4	39,6	76,4	39,6	40	0,4			
3150	86,3	10,9	34,5	39,6	75,2	39,6	40	0,4			
4000	84,1	10,9	31,2	40,5	71,9	40,5	-	-			
5000	84,5	11,2	30,1	41,8	71,8	41,8	-	-			
Total	97,6	21,6	61,4	-	-	-	-	25,3	-	-	-

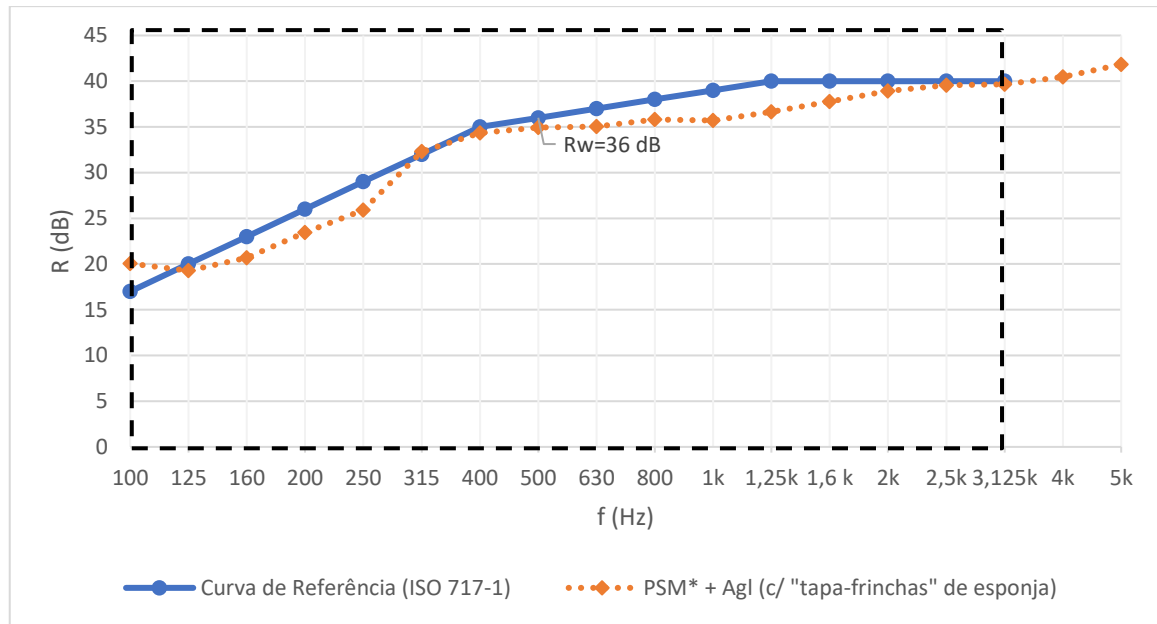


Figura A.4 - Resultados da redução sonora da PSM* + Agl, com o “tapa-frinchas” de esponja, para cada banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz) e curva de referência adotada da NP EN ISO 717-1 [8]

- Porta *Standard* Melhorada com placa de 20 mm de *Aglomerado 120 KG* e tela de 4 mm de *Flexitect G+*(PSM* + Agl + Flex), com o “tapa-frinchas” de esponja (Fig. 4.18)

Quadro A.5 - Resultados detalhados da PSM* + Agl + Flex, com o “tapa-frinchas”, para cálculo da redução sonora em função da banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz), do índice de redução sonora R_w e respetivos termos de adaptação espectral C e C_{tr}

Frequência (Hz, 1/3 oitava)	L_E (dB)	L_r (dB)	L_R (dB)	R_{conj} (dB)	R_{marg} (dB)	R (dB)	Curva de referência	Dif.	R_w (dB)	C (dB)	C_{tr} (dB)
100	82,7	11,8	57,2	19,8	42,2	19,8	18	negativo	37	-2	-5
125	81,8	9,2	55,8	19,1	50,7	19,1	21	1,9			
160	79,8	6,7	51,6	21,1	49,1	21,1	24	2,9			
200	83,3	5,7	50,7	24,8	57,1	24,8	27	2,2			
250	84,2	6,5	48,5	26,9	59,8	26,9	30	3,1			
315	87,1	6,6	45,6	32,6	65,4	32,6	33	0,4			
400	86,9	6,1	44,1	33,9	72,1	33,9	36	2,1			
500	85,7	6,9	41,9	34,5	76,8	34,5	37	2,5			
630	86,8	7,3	41,9	35,1	81,8	35,1	38	2,9			
800	85,2	7,9	39,0	36,0	80,2	36,0	39	3,0			
1000	82,8	8,4	35,0	37,3	76,4	37,3	40	2,7			
1250	81,1	8,9	32,3	37,9	73,6	37,9	41	3,1			
1600	84,1	9,6	34,1	38,8	75,7	38,8	41	2,2			
2000	87,2	10,1	36,0	39,7	77,1	39,7	41	1,3			
2500	87,9	10,9	35,9	40,0	76,4	40,0	41	1,0			
3150	86,3	10,9	34,6	39,5	75,2	39,5	41	1,5			
4000	84,1	10,9	31,0	40,7	71,9	40,7	-	-			
5000	84,5	11,2	30,6	41,3	71,8	41,3	-	-			
Total	97,6	21,6	61,3	-	-	-	-	32,0	-	-	-

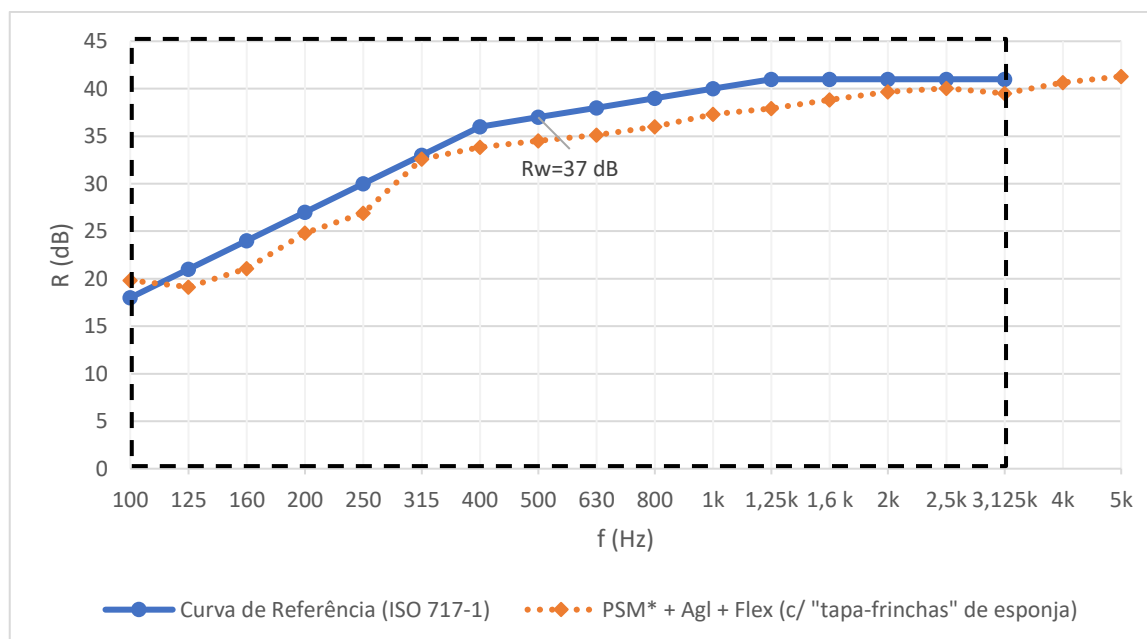


Figura A.5 - Resultados da redução sonora da PSM* + Agl+ Flex, com o “tapa-frinchas” de esponja, para cada banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz) e curva de referência adotada da NP EN ISO 717-1 [8]

- Porta *Standard* Melhorada com placa de 20 mm de *Aglomerado 120 KG* e tela de 4 mm de *EPDM 130 Negro* (PSM* + Agl + EPDM), com o “tapa-frinchas” de esponja (Fig. 4.18)

Quadro A.6 - Resultados detalhados da PSM* + Agl + EPDM, com o “tapa-frinchas”, para cálculo da redução sonora em função da banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz), do índice de redução sonora R_w e respetivos termos de adaptação espectral C e C_{tr}

Frequência (Hz, 1/3 oitava)	L_E (dB)	L_T (dB)	L_R (dB)	R_{conj} (dB)	R_{marg} (dB)	R (dB)	Curva de referência	Dif.	R_w (dB)	C (dB)	C_{tr} (dB)
100	82,7	11,8	57,5	19,6	42,2	19,6	18	negativo	37	-2	-5
125	81,8	9,2	55,8	19,0	50,7	19,0	21	2,0			
160	79,8	6,7	51,2	21,4	49,1	21,5	24	2,5			
200	83,3	5,7	50,4	25,1	57,1	25,1	27	1,9			
250	84,2	6,5	48,6	26,8	59,8	26,8	30	3,2			
315	87,1	6,6	45,5	32,7	65,4	32,7	33	0,3			
400	86,9	6,1	43,8	34,1	72,1	34,1	36	1,9			
500	85,7	6,9	41,4	35,1	76,8	35,1	37	1,9			
630	86,8	7,3	41,3	35,7	81,8	35,7	38	2,3			
800	85,2	7,9	38,1	37,0	80,2	37,0	39	2,0			
1000	82,8	8,4	34,6	37,7	76,4	37,7	40	2,3			
1250	81,1	8,9	32,7	37,5	73,6	37,5	41	3,5			
1600	84,1	9,6	34,1	38,9	75,7	38,9	41	2,1			
2000	87,2	10,1	35,5	40,2	77,1	40,2	41	0,8			
2500	87,9	10,9	35,8	40,2	76,4	40,2	41	0,8			
3150	86,3	10,9	34,3	39,8	75,2	39,8	41	1,2			
4000	84,1	10,9	31,2	40,5	71,9	40,5	-	-			
5000	84,5	11,2	30,1	41,8	71,8	41,8	-	-			
Total	97,6	21,6	61,4	-	-	-	-	28,8	-	-	-

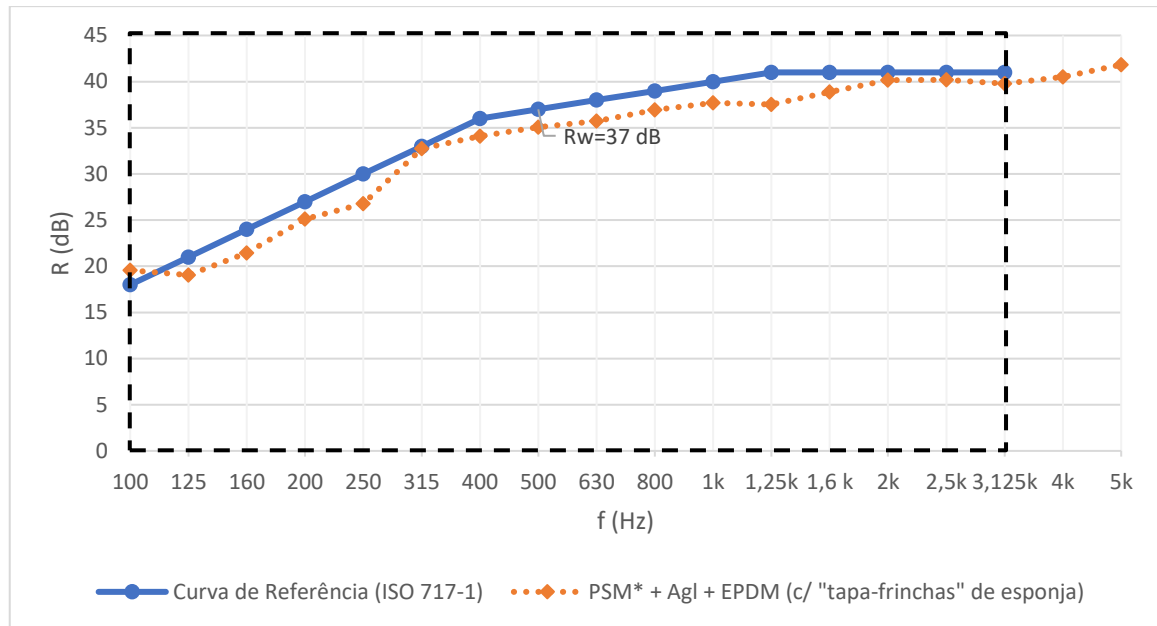


Figura A.6 - Resultados da redução sonora da PSM* + Agl+ EPDM, com o "tapa-frinchas" de esponja, para cada banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz) e curva de referência adotada da NP EN ISO 717-1 [8]

- Porta *Standard* Melhorada com placa de 20 mm de PENA 30 FR (PSM* + PENA), com o "tapa-frinchas" de esponja (Fig. 4.18)

Quadro A.7 - Resultados detalhados da PSM* + PENA, com o "tapa-frinchas", para cálculo da redução sonora em função da banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz), do índice de redução sonora R_w e respetivos termos de adaptação espectral C e C_{tr}

Frequência (Hz, 1/3 oitava)	L_E (dB)	L_r (dB)	L_R (dB)	R_{conj} (dB)	R_{marg} (dB)	R (dB)	Curva de referência	Dif.	R_w (dB)	C (dB)	C_{tr} (dB)
100	82,7	11,8	56,5	20,6	42,2	20,6	15	negativo	34	-1	-5
125	81,8	9,2	55,3	19,5	50,7	19,5	18	negativo			
160	79,8	6,7	53,2	19,4	49,1	19,4	21	1,6			
200	83,3	5,7	56,8	18,7	57,1	18,7	24	5,3			
250	84,2	6,5	53,3	22,1	59,8	22,1	27	4,9			
315	87,1	6,6	49,6	28,6	65,4	28,6	30	1,4			
400	86,9	6,1	45,5	32,4	72,1	32,4	33	0,6			
500	85,7	6,9	43,5	33,0	76,8	33,0	34	1,0			
630	86,8	7,3	43,8	33,2	81,8	33,2	35	1,8			
800	85,2	7,9	41,6	33,5	80,2	33,5	36	2,5			
1000	82,8	8,4	38,2	34,1	76,4	34,2	37	2,8			
1250	81,1	8,9	34,3	35,9	73,6	35,9	38	2,1			
1600	84,1	9,6	36,1	36,9	75,7	36,9	38	1,1			
2000	87,2	10,1	37,2	38,5	77,1	38,5	38	negativo			
2500	87,9	10,9	36,6	39,3	76,4	39,3	38	negativo			
3150	86,3	10,9	34,7	39,4	75,2	39,4	38	negativo			
4000	84,1	10,9	32,3	39,4	71,9	39,4	-	-			
5000	84,5	11,2	31,0	40,9	71,8	40,9	-	-			
Total	97,6	21,6	62,8	-	-	-	-	25,2	-	-	-

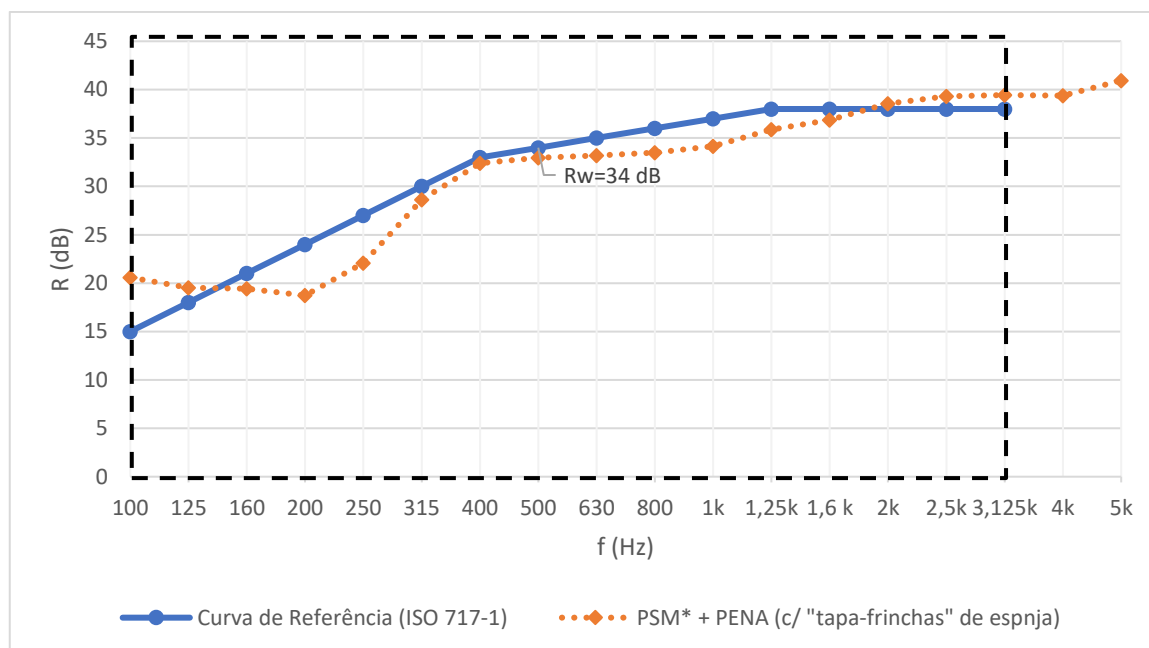


Figura A.7 - Resultados da redução sonora da PSM* + PENA, com o “tapa-frinchas” de esponja, para cada banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz) e curva de referência adotada da NP EN ISO 717-1 [8]

- Porta *Standard* Melhorada com placa de 19 mm de contraplacado (PSM* + CP), com o “tapa-frinchas” de esponja (Fig. 4.18)

Quadro A.8 - Resultados detalhados da PSM* + CP, com o “tapa-frinchas”, para cálculo da redução sonora em função da banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz), do índice de redução sonora R_w e respetivos termos de adaptação espectral C e C_{tr}

Frequência (Hz, 1/3 oitava)	L_E (dB)	L_r (dB)	L_R (dB)	R_{conj} (dB)	R_{marg} (dB)	R (dB)	Curva de referência	Dif.	R_w (dB)	C (dB)	C_{tr} (dB)
100	82,7	11,8	55,2	22,1	42,2	22,1	17	negativo	36	-1	-4
125	81,8	9,2	55,7	19,7	50,7	19,7	20	0,3			
160	79,8	6,7	50,1	24,2	49,1	24,2	23	negativo			
200	83,3	5,7	50,1	26,3	57,1	26,3	26	negativo			
250	84,2	6,5	48,2	28,1	59,8	28,1	29	0,9			
315	87,1	6,6	46,8	32,0	65,4	32,0	32	0,0			
400	86,9	6,1	45,4	32,7	72,1	32,7	35	2,3			
500	85,7	6,9	45,3	31,2	76,8	31,2	36	4,8			
630	86,8	7,3	44,0	32,7	81,8	32,7	37	4,3			
800	85,2	7,9	39,8	35,4	80,2	35,4	38	2,6			
1000	82,8	8,4	35,4	37,4	76,4	37,4	39	1,6			
1250	81,1	8,9	32,3	38,5	73,6	38,5	40	1,5			
1600	84,1	9,6	34,1	39,5	75,7	39,5	40	0,5			
2000	87,2	10,1	35,1	40,4	77,1	40,4	40	negativo			
2500	87,9	10,9	36,1	39,2	76,4	39,3	40	0,7			
3150	86,3	10,9	34,2	39,7	75,2	39,7	40	0,3			
4000	84,1	10,9	30,2	41,4	71,9	41,4	-	-			
5000	84,5	11,2	29,6	42,3	71,8	42,3	-	-			
Total	97,6	21,6	60,6	-	-	-	-	19,9	-	-	-

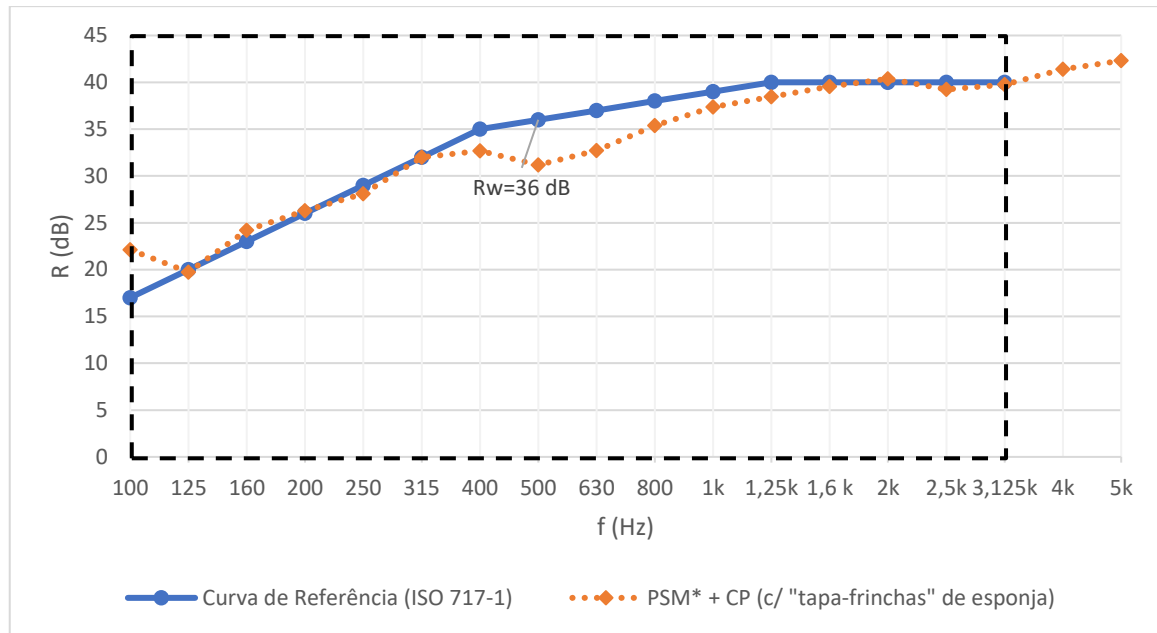


Figura A.8 - Resultados da redução sonora da PSM* + CP, com o “tapa-frinchas” de esponja, para cada banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz) e curva de referência adotada da NP EN ISO 717-1 [8]

- Porta *Standard* Melhorada com placa de 19 mm de MDF (PSM* + MDF), com o “tapa-frinchas” de esponja (Fig. 4.18)

Quadro A.9 - Resultados detalhados da PSM* + MDF, com o “tapa-frinchas”, para cálculo da redução sonora em função da banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz), do índice de redução sonora R_w e respetivos termos de adaptação espectral C e C_{tr}

Frequência (Hz, 1/3 oitava)	L_E (dB)	L_r (dB)	L_R (dB)	R_{conj} (dB)	R_{marg} (dB)	R (dB)	Curva de referência	Dif.	R_w (dB)	C (dB)	C_{tr} (dB)
100	82,7	11,8	55,1	22,2	42,2	22,2	17	negativo	36	-2	-4
125	81,8	9,2	55,1	20,3	50,7	20,3	20	negativo			
160	79,8	6,7	50,1	24,1	49,1	24,2	23	negativo			
200	83,3	5,7	49,4	27,0	57,1	27,0	26	negativo			
250	84,2	6,5	48,0	28,3	59,8	28,3	29	0,7			
315	87,1	6,6	47,1	31,6	65,4	31,6	32	0,4			
400	86,9	6,1	46,1	31,9	72,1	31,9	35	3,1			
500	85,7	6,9	44,7	31,7	76,8	31,7	36	4,3			
630	86,8	7,3	44,5	32,2	81,8	32,2	37	4,8			
800	85,2	7,9	41,7	33,5	80,2	33,5	38	4,5			
1000	82,8	8,4	37,9	34,8	76,4	34,8	39	4,2			
1250	81,1	8,9	34,1	36,6	73,6	36,6	40	3,4			
1600	84,1	9,6	35,8	37,8	75,7	37,8	40	2,2			
2000	87,2	10,1	36,2	39,3	77,1	39,3	40	0,7			
2500	87,9	10,9	36,7	38,6	76,4	38,6	40	1,4			
3150	86,3	10,9	35,2	38,7	75,2	38,7	40	1,3			
4000	84,1	10,9	32,2	39,4	71,9	39,4	-	-			
5000	84,5	11,2	31,2	40,7	71,8	40,7	-	-			
Total	97,6	21,6	60,4	-	-	-	-	30,8	-	-	-

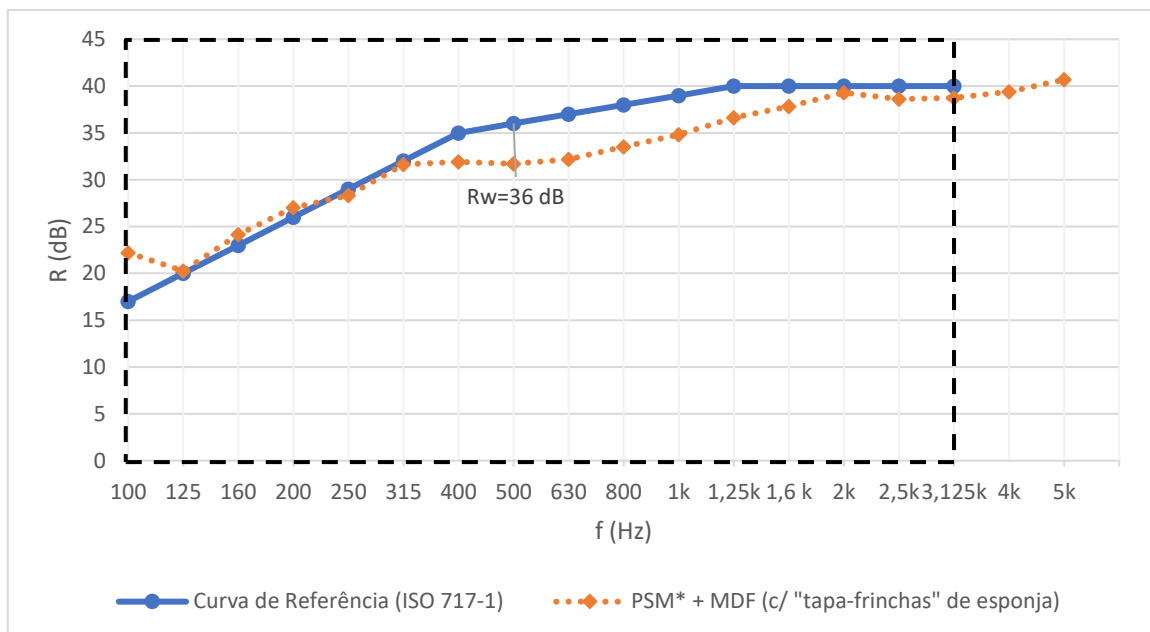


Figura A.9 - Resultados da redução sonora da PSM* + MDF, com o “tapa-frinchas” de esponja, para cada banda de frequência (1/3 oitava dos 100 aos 5000 Hz) e curva de referência adotada da NP EN ISO 717-1 [8]

